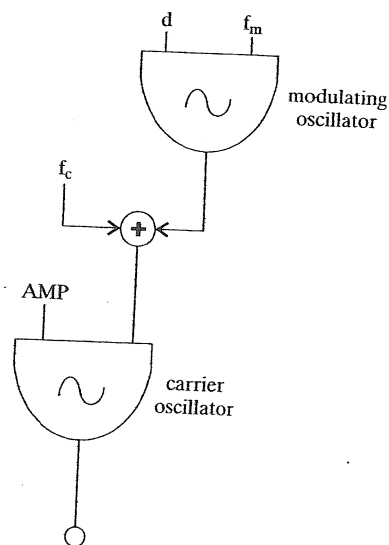


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Διπλωματική Εργασία του

Κασφίκη Νικολάου ΑΕΜ 878

*με τίτλο: «FM ΣΥΝΘΕΣΗ ΗΧΟΥ: Βασικές αρχές λειτουργίας και
πρακτικές εφαρμογές»*



Επιβλέπων Καθηγητής: Αιμίλιος Καμπουρόπουλος

Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο	Τίτλος	Σελίδα
1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ-ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ FM ΣΥΝΘΕΣΗΣ	6
2.1	Απλή FM	6
2.2	Η αναλογία για C:M	8
2.3	Συντελεστής διαμόρφωσης	10
2.4	Υπολογισμός αριθμού και θέσης πλευρικών συχνοτήτων	13
2.5	Υπολογισμός της έντασης πλευρικών συχνοτήτων. Οι συναρτήσεις Bessel	13
2.6	Ανακλώμενες συχνότητες και εντάσεις αυτών	16
2.7	Ψευδής παραμόρφωση (aliasing distortion)	20
2.8	Συνθέτοντας ένα χρονικά μεταβαλλόμενο φάσμα	21
2.9	Εκθετική FM	24
3	ΣΥΝΘΕΤΗ FM	26
3.1	Προσθετοί φορείς με ανεξάρτητους διαμορφωτές	26
3.2	Προσθετοί φορείς με έναν διαμορφωτή	27
3.3	Ένας φορέας με παράλληλους διαμορφωτές	31
3.4	Ένας φορέας με διαμορφωτές σε σειρά	34
3.5	Αναδραστική (Feedback) FM	36
3.5.1	Feedback με έναν ταλαντωτή	39
3.5.2	Feedback με δύο ταλαντωτές	41
3.5.3	Έμμεσο (indirect) feedback με τρεις ταλαντωτές	44
4	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ FM ΣΕ ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	45
4.1	Το DX7	47
4.2	FM8	49
4.3	Virtual Waves	56
4.4	MAX MSP	59
4.5	Επιμέρους συγκριτική αναφορά των προγραμμάτων FM8, Virtual Waves και MAX MSP	61
	Επίλογος	63
	Βιβλιογραφία	64
	Διαδικτυακές πηγές	65

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

«Ονειρεύομαι μουσικά όργανα ταγμένα στη δική μου βούληση, και τα οποία θα συνεισφέρουν στη δημιουργία ενός ολοκαίνουργιου κόσμου πρωτάκουστων ήχων, σύμφωνα με τις ανάγκες του εσωτερικού μου ρυθμού». Όταν ο Edgard Varese είπε αυτές τις λέξεις το 1937, δε μπορούσε να φανταστεί πως προμήνυε την ύπαρξη ενός μεγάλου κεφαλαίου στη μοντέρνα μουσική ιστορία: αυτό της ηλεκτρονικής μουσικής. (<http://music.calarts.edu/~eric/cm.html>)

Θα αναφερθούμε σύντομα σε μερικές εφευρέσεις του τέλους του 19^{ου} αιώνα και των αρχών του 20^{ου}, καθώς και σε τρόπους σύνθεσης ήχου έως και το 1970 περίπου, λίγο πριν την εμφάνιση δηλαδή του τρόπου σύνθεσης που πραγματεύεται αυτή η διπλωματική εργασία.

Το 1896, μια πατέντα καταχωρημένη στο όνομα του Thaddeus Cahill, περιγράφει ένα «βασισμένο στον ηλεκτρισμό σύστημα σύνθεσης ήχου γνωστό ως Dynamophone ή Telharmonium, το πρώτο πλήρως ανεπτυγμένο μοντέλο του οποίου παρουσιάστηκε στο κοινό το 1906...» (<http://music.calarts.edu/~eric/cm.html>). Ο Cahill (1867-1934) ήταν ένας προικισμένος εφευρέτης με πολύ προχωρημένες ιδέες για την εποχή του. (Holmes, 2002) Το 1896 δημιούργησε μια πατέντα με σκεπτικό να «παράγει μουσική με ηλεκτρικό τρόπο με ήχους καλής ποιότητας», καθώς και να μεταδίδει τη μουσική αυτή μέσω των τηλεφωνικών καλωδίων σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία σε πραγματικό χρόνο (live) (Holmes, 2002) Η φιλοσοφία της συσκευής αυτής ήταν η πρόσθεση συχνοτήτων που παράγονταν ηλεκτρικά μέσα από ένα σύστημα περιστρεφόμενων αξόνων, έτσι ώστε μέσα από την πρόσθεση των τόνων να παραχθούν ήχοι που μοιάζουν με ήχους οργάνων κλασσικής ορχήστρας (Holmes, 2002). Τρεις συσκευές κατασκευάστηκαν συνολικά από το 1900 έως το 1911. Το Telharmonium ενθουσίασε αρχικά με την ποιότητα των ήχων του και την έλλειψη θορύβου από τα εξαρτήματά του. Λόγω όμως της δυσκολίας κατασκευής του, του όγκου του (200 τόνοι βάρος και 30 μέτρα μήκος) (<http://music.calarts.edu/~eric/cm.html>), καθώς και τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη μετάδοση του ήχου μέσα από τις τηλεφωνικές γραμμές, η εταιρία που είχε αναλάβει τη χρηματοδότηση και παραγωγή του κήρυξε πτώχευση στα τέλη της δεκαετίας του 1920 (Holmes, 2002).

Μια άλλη εφεύρεση της εποχής (1927) ήταν το “Theremin”, που πήρε το όνομά του από το Ρώσο ηλεκτρολόγο μηχανικό Lev Teremin, που έγινε περισσότερο γνωστός με το αγγλοποιημένο του όνομα, Leon Theremin (1927-1993). Η συσκευή αυτή ήταν πολύ μικρότερη από το Telharmonium, (50 × 50 εκατοστά περίπου σε μήκος και ύψος). Λειτουργούσε με την ανάμειξη δύο περίπου ίδιων σε συχνότητα ηλεκτρικών σημάτων και παρήγαγε κύματα που ήταν ίσα σε συχνότητα με τη διαφορά των δύο παραπάνω συχνοτήτων. Οι ήχοι που παρήγαγε ήταν σχεδόν τόνοι (απλές ημιτονοειδείς κυματομορφές) εμπλουτισμένοι με λίγους αρμονικούς που τους έδιναν έναν σχετικό όγκο. Μία από τις δύο συχνότητες μεταβαλλόταν με την κίνηση του ανθρώπινου χεριού μέσα στο χώρο σε σχέση με μια μικρή κεραία. Το Theremin γνώρισε αρκετή επιτυχία και αρκετές μεταγενέστερες εφευρέσεις μιμήθηκαν τη φιλοσοφία του.

Αργότερα, στις αρχές της δεκαετίας του '60 έγινε γνωστή μία τεχνική σύνθεσης ήχου που με πρωτόγονο τρόπο είχε χρησιμοποιηθεί και στο Telharmonium, η προσθετική (additive) σύνθεση (http://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/Additive_Synthesis_Computer_Music.html). Φιλοσοφία του τρόπου αυτού σύνθεσης ήχου ήταν η πρόσθεση σένα φάσμα πολλών απλών τόνων, με σκοπό τη δημιουργία σύνθετων ήχων που είτε θα μιμούντουσαν ήδη υπάρχοντες φυσικούς ήχους, ή θα στεκόντουσαν μόνοι τους ως πρωτότυποι (Dodge και Jerse, 1985). Η μέθοδος αυτή ήταν εξαιρετικά ακριβής και σίγουρη, αφού με τη βοήθεια μιας φασματογραφικής ανάλυσης καθώς και πολλών ταλαντωτών, θα μπορούσε κάποιος θεωρητικά να αναπαράγει οποιονδήποτε ήχο ήθελε, «χτίζοντάς» τον με τόνους. Αυτή η τεχνική αποδείχτηκε εξαιρετικά δύσκολη στην πράξη γιατί πολλές φορές για την σωστή αναπαράσταση ενός ήχου χρειαζόντουσαν πολλές δεκάδες, ίσως κι εκατοντάδες απλών τόνων, πράγμα που σημαίνει αντίστοιχο αριθμό ταλαντωτών. Επίσης, κάθε ταλαντωτής έπρεπε να έχει σωστά ρυθμισμένο και το πλάτος ταλάντωσης (ένταση) του τόνου που παράγει, καθώς και τη μεταβολή του πλάτους αυτού στη μονάδα του χρόνου. Όλα αυτά ήταν αρκετά κοπιαστικά για εκείνη την εποχή (Holmes, 2002).

Την ίδια εποχή περίπου, ένας άλλος τρόπος σύνθεσης ήχου έγινε γνωστός: Η αφαιρετική (subtractive) σύνθεση. Η μέθοδος αυτή, σε αντίθεση με την προσθετική σύνθεση χρησιμοποιεί αρχικά ένα σύνθετο φάσμα (Διαμαντόπουλος Τ. 2004) το οποίο μορφοποιείται κυρίως εξασθενώντας ή αφαιρώντας εντελώς κάποια μέρη του (συχνότητες). Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ειδικών φίλτρων. Οποιοσδήποτε ήχος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πηγή για την αφαιρετική σύνθεση (Dodge και Jerse,

1985). Όσο πιο πλούσιος είναι ένας ήχος τόσο πιο πιθανό είναι να περιέχει τις συχνότητες που χρειάζεται ο συνθέτης και οι οποίες θα μείνουν μετά το φιλτράρισμα των υπολοίπων συχνοτήτων που δεν χρειάζονται. Και αυτό το είδος σύνθεσης είχε τα αρνητικά του, αφού δεν ήταν εύκολο να εφαρμοστούν με ακρίβεια όλα αυτά τα φίλτρα που χρειαζόντουσαν προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Πολλές, παρόμοιες με τις παραπάνω, μέθοδοι και τεχνικές σύνθεσης ήχου αναπτύχθηκαν στα τέλη του 19^{ου} και κυρίως στον 20^ο αιώνα έως και το 1973. Με όλες αυτές τις μεθόδους και όργανα σύνθεσης ήχου να ευδοκιμούν ακόμη, άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο, γύρω στο 1974 ο John Chowning πετυχαίνει με την εφεύρεση της FM (Frequency Modulation) την πιο μεγάλη πρόοδο στη βελτίωση της ποιότητας παραγωγής ηλεκτρονικά συνθετιμένου ήχου (Dodge και Jerse, 1985). Με την παρουσία εξαιρετικά μικρού αριθμού ταλαντωτών (δύο έως το πολύ έξι) (Διαμαντόπουλος Τ. 2004), μπορεί να παραχθεί μια πολύ μεγάλη ποικιλία ηχοχρωμάτων τα οποία στη συνέχεια μπορούν να ελεγχθούν πάρα πολύ εύκολα (Dodge και Jerse, 1985). Η πατέντα της FM αγοράστηκε από τη Yamaha και είχε την πιο μεγάλη εμπορική επιτυχία στους ηλεκτρονικούς συνθετητές (synthesizers) με το DX7 και το καθιέρωσε σαν ένα από τα best-sellers συνθετητών όλων των εποχών (Διαμαντόπουλος Τ. 2004).

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η κατάδειξη σε πρώτο βαθμό των ειδών, μεθόδων και λειτουργιών της FM σύνθεσης ήχου. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της FM καθώς επίσης εξηγούνται θεμελιώδεις έννοιές της. Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει τη σχεδίαση σύνθετων οργάνων FM σύνθεσης. Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται ορισμένες ενδεικτικές εφαρμογές της FM σε αναλογικά και ψηφιακά συστήματα. Δεν ήταν στόχος της εργασίας αυτής να μυήσει τον αναγνώστη σε μαθηματικές εξισώσεις και τρόπους προγραμματισμού και υπολογισμού τιμών και παραμέτρων στην FM. Προσπαθήθηκε να δοθεί μια όσο το δυνατόν πιο σαφής εικόνα της έννοιας και της λειτουργίας της στα πλαίσια των άρθρων και βιβλίων που έχουν γραφτεί έως σήμερα, αλλά και μέσα από προγράμματα software τα οποία εφαρμόζουν στα μάτια του αναγνώστη σε πρακτικό επίπεδο τα όσα θεωρητικά γράφονται ή έχουν γραφτεί κατά καιρούς.

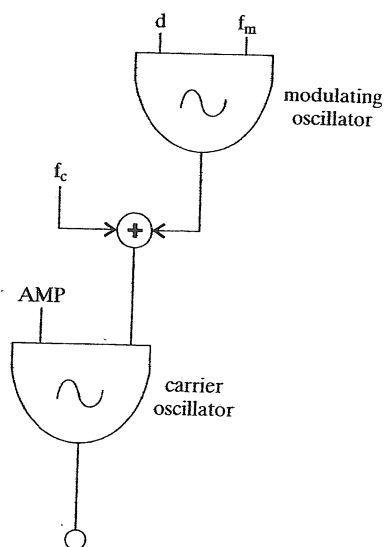
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ-ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ FM ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Η FM (Frequency Modulation) σύνθεση ήχου είναι από τις πιο γνωστές μεθόδους ηλεκτρονικής σύνθεσης ήχου, λόγω της υιοθέτησής της από την Yamaha corporation. (Roads, 1999) Η μέθοδος αυτή γεννήθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 από τον John Chowning, καθηγητή στο πανεπιστήμιο του Stanford. Η FM σύνθεση βασίζεται στις ίδιες αρχές που χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνική μετάδοση FM. Τα πρώτα πειράματα του Chowning περιλάμβαναν έναν ταλαντωτή (modulator = διαμορφωτής) το οποίο ρύθμιζε τη συχνότητα ταλάντωσης ενός άλλου ταλαντωτή (carrier = φορέας). Με τον τρόπο αυτό παρήγαγε ήχους με πλούσιο ακουστικό φάσμα. (Miranda, 2002). Ένα εισαγωγικό παράδειγμα για τη λειτουργία της FM σύνθεσης είναι το vibrato. Η διαφορά βεβαίως είναι πως για το vibrato χρησιμοποιείται ένα σήμα υποηχητικής συχνότητας για τη ταλάντωση του φορέα (carrier). Υποηχητικό είναι ένα σήμα με χαμηλή συχνότητα, αρκετά χαμηλότερη από το κατώφλι της ανθρώπινης ακοής (το οποίο υπολογίζεται στα 20 Hz). Ο ήχος λοιπόν που παράγεται στην περίπτωση αυτή έχει μια αισθητά αργή απόκλιση στο τονικό του ύψος. Αν τώρα η συχνότητα του ταλαντωτή είναι πάνω από το κατώφλι της ανθρώπινης ακοής, τότε προκύπτουν επιπλέον συχνότητες οι οποίες αλλάζουν το ηχόχρωμα του ήχου του φορέα. Υπάρχουν διάφορα είδη FM σύνθεσης. Το πιο απλό και θεμελιώδες από αυτά απαρτίζεται από δύο ταλαντωτές, οι οποίοι είναι : α) ο διαμορφωτής (modulator) και β) ο φορέας (carrier). Με την απλή αυτή αρχιτεκτονική μπορεί να παραχθεί ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος διαφορετικών ήχων. Πιο περίπλοκα φτιαγμένοι ηλεκτρονικοί ήχοι μπορεί να είναι αποτέλεσμα συνδυασμού περισσότερων διαμορφωτών και φορέων αντίστοιχα. (Miranda, 2002)

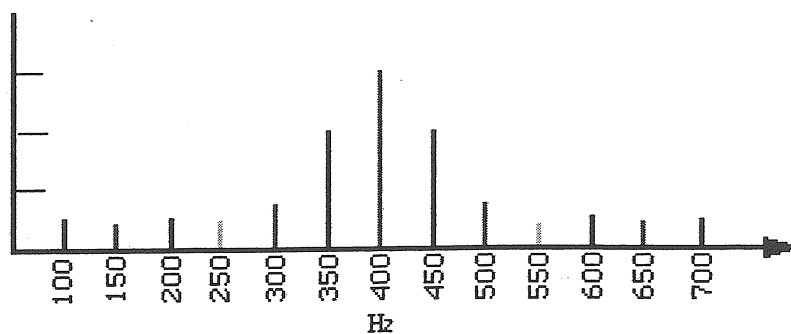
2.1 Απλή FM

Στη βασική τεχνική σύνθεσης FM (αναφερόμενη ως απλή FM ή αλλιώς Chowning FM) ένας φορέας ταλαντωτής (carrier oscillator) τροποποιείται από έναν διαμορφωτή ταλαντωτή (modulator oscillator). Η εικόνα 1 απεικονίζει μια απλή

τεχνική FM. Στην εικόνα αυτή, ανάμεσα στους δύο ταλαντωτές (modulator και carrier) παρεμβαίνει ένας ελεγκτής (envelope/amplifier) του οποίου ο σκοπός είναι ο καθορισμός του βαθμού τροποποίησης του φορέα από το διαμορφωτή, και ο οποίος θα εξηγηθεί αναλυτικότερα παρακάτω.



Εικόνα 1 Βασική FM με έναν φορέα και έναν διαμορφωτή. (Διαμαντόπουλος, 2004)



Εικόνα 2 Διάγραμμα συχνοτήτων και έντασης σε μια απλή FM. (Διαδίκτυο: <http://www.indiana.edu/~emusic/fm/fm.htm>)

Στην εικόνα 2 ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τη συχνότητα (frequency) και ο κάθετος άξονας το πλάτος (amplitude). Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συχνότητα των 400 Hz είναι η συχνότητα του φορέα (carrier) η οποία τροποποιείται από μια συχνότητα των 50 Hz. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί στην ουσία μια σειρά από ζευγάρια συχνοτήτων, εκατέρωθεν της συχνότητας του φορέα, των οποίων η συχνότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τον εξής τύπο: $C \pm (M \times n)$ όπου C = συχνότητα φορέα, M = συχνότητα διαμορφωτή και n είναι ένας αριθμός που ξεκινάει από το 1 και αυξάνεται κατά μία ακέραια μονάδα. (Roads1999)

2.2 Η αναλογία C : M

Η ακριβής θέση των πλευρικών συχνοτήτων που παράγονται στην FM εξαρτάται από τον λόγο της συχνότητας του φορέα (C) προς τη συχνότητα του διαμορφωτή (M), δηλαδή από την αναλογία C : M. Όσον αφορά τις συνέπειές της στο παραγόμενο φάσμα, η αναλογία C : M χωρίζεται σε δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση υφίσταται όταν το αποτέλεσμα (πηλίκο) του λόγου C : M είναι ακέραιος αριθμός (για παράδειγμα όταν C = 800 Hz και M = 200 Hz). Σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται ένα αρμονικό φάσμα πλευρικών συχνοτήτων, που σημαίνει ότι, οι πλευρικές συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας του διαμορφωτή (modulator) ή και του φορέα (carrier) :

$$C = 800 \text{ Hz} \quad (\text{φορέας})$$

$$C + M = 1000 \text{ Hz}$$

$$C + (2 \times M) = 1200 \text{ Hz}$$

$$C + (3 \times M) = 1400 \text{ Hz, κλπ.}$$

$$C - M = 600 \text{ Hz}$$

$$C - (2 \times M) = 400 \text{ Hz}$$

$$C - (3 \times M) = 200 \text{ Hz, κλπ.}$$

Όταν τώρα το αποτέλεσμα (πηλίκο) του λόγου $C : M$ είναι μη ακέραιος αριθμός όπως για παράδειγμα $8 : 2,1$ (όπως στο παράδειγμα που ακολουθεί, στο οποίο ο φορέας έχει συχνότητα 800 Hz και ο διαμορφωτής 210 Hz), δημιουργείται μη αρμονικό φάσμα πλευρικών συχνοτήτων (μη ακέραια πολλαπλάσια του φορέα και του διαμορφωτή) (Roads, 1999)

$$C = 800 \text{ Hz} \quad (\text{φορέας})$$

$$C + M = 1010 \text{ Hz}$$

$$C + (2 \times M) = 1220 \text{ Hz}$$

$$C + (3 \times M) = 1430 \text{ Hz, κλπ.}$$

$$C - M = 590 \text{ Hz}$$

$$C - (2 \times M) = 380 \text{ Hz}$$

$$C - (3 \times M) = 170 \text{ Hz, κλπ.}$$

Σύμφωνα με τον Jeffrey Hass, καθηγητή στο “Center for Electronic and Computer Music, Indiana University”, «θεωρητικά», «αρμονικά συγγενικό» (harmonically related) φάσμα παράγεται όταν ο λόγος (όχι το αποτέλεσμα της διαίρεσης) $C : M$ μπορεί να αναχθεί σε ακέραιους αριθμούς (π.χ. $2 : 2.2$ μπορεί να αναχθεί σε $20 : 22$, οι οποίοι είναι ακέραιοι αριθμοί) (Hass 1995)

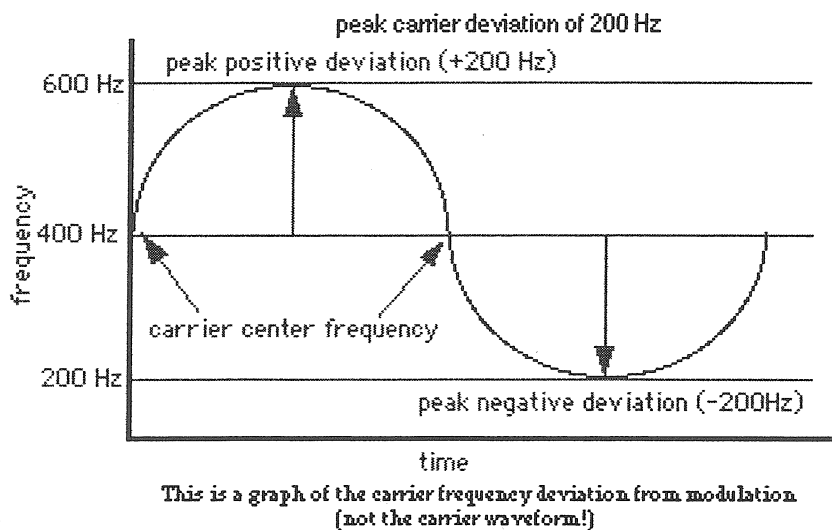
Θα μπορούσε λοιπόν να συμπεράνει κανείς από τα παραπάνω πως όσο μικρότεροι είναι οι ακέραιοι αριθμοί του αριθμητή και του παρονομαστή, τόσο αρμονικότερο ακούγεται το αποτέλεσμα. Σίγουρα το αποτέλεσμα δεν ακούγεται καθόλου αρμονικό όταν ένας από τους δύο συντελεστές του κλάσματος ή και οι δύο είναι άρρητοι αριθμοί.

2.3 Συντελεστής διαμόρφωσης

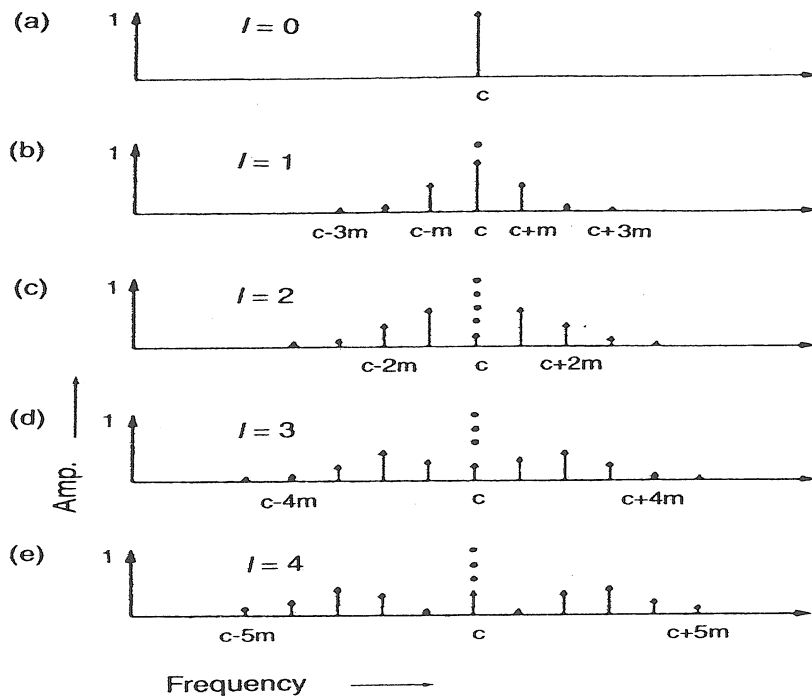
Όπως συμβαίνει σε όλες τις σύνθετες κυματομορφές, η χροιά του ήχου, όπως την αντιλαμβάνεται ο ακροατής, δεν καθορίζεται μόνο από την παρουσία των όποιων συχνοτήτων, αλλά και από τις σχετικές εντάσεις τους.

Η ψηλότερη και η χαμηλότερη συχνότητα κάθε ζεύγους έχουν την ίδια ένταση. Προκειμένου να υπολογίσουμε την ένταση κάθε ζεύγους των πλευρικών συχνοτήτων και τη σχέση αυτής με τις εντάσεις των υπόλοιπων ζευγών συχνοτήτων, πρέπει να δούμε τον πρωταρχικό παράγοντα που τις καθορίζει. Όταν ο φορέας (carrier) δέχεται τη τροποποίηση από τον διαμορφωτή (modulator), η συχνότητά του αποκλίνει εκατέρωθεν της αρχικής, ανάλογα με την ένταση του κύματος του διαμορφωτή. Όσο πιο μεγάλη είναι αυτή η ένταση (πλάτος ταλάντωσης), τόσο μεγαλύτερη και η παραπάνω απόκλιση. Αν η συχνότητα του διαμορφωτή ήταν υπόηχος (κάτω από 20 Hz) τότε θα μιλούσαμε για βάθος vibrato. Όταν χρησιμοποιούμε απλό ημιτονοειδές κύμα, αυτή η απόκλιση μεταφράζεται με ίδιο αριθμό Hz πάνω και κάτω από την κεντρική συχνότητα του φορέα. Η συχνότητα λοιπόν πάνω και κάτω από την κεντρική, εκεί που έχει τη μεγαλύτερη απόσταση απ' αυτήν, ονομάζεται μέγιστη απόκλιση (peak deviation) η αλλιώς απόκλιση συχνότητας (frequency deviation) = Δf

η αλλιώς σκέτο D . Στην εικόνα 3 δίνεται ένα παράδειγμα όπου η μέγιστη απόκλιση (peak deviation) από την κεντρική συχνότητα του φορέα είναι 200 Hz. Στον οριζόντιο άξονα παριστάνεται ο χρόνος και στον κάθετο άξονα η συχνότητα. Η κεντρική συχνότητα του φορέα (carrier center frequency) είναι 400 Hz. Έχουμε λοιπόν μια ημιτονοειδή καμπύλη η οποία ξεκινά από τη συχνότητα του φορέα = 400 Hz, στη συνέχεια φτάνει στο μέγιστο σημείο των 600 Hz και συνεχίζει φθίνοντας, όπως βλέπουμε στην εικόνα (Hass, 1995). Επομένως το D εκφράζει το βάθος η αλλιώς το ποσοστό της διαμόρφωσης. Αν τώρα πάρουμε το λόγο D/M (όπου M η συχνότητα του διαμορφωτή), έχουμε τον συντελεστή διαμόρφωσης (modulation index) τον οποίο συμβολίζουμε με το λατινικό γράμμα I . (Hass, 1995). Επομένως, $I = D / M$. Έχοντας για παράδειγμα $D = 100$ Hz και συχνότητα διαμορφωτή $M = 100$ Hz, ο συντελεστής διαμόρφωσης I θα είναι 1.



Εικόνα 3 Η απόκλιση της συχνότητας του φορέα λόγω της διαμόρφωσής του από το διαμορφωτή. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το χρόνο και ο κάθετος τη συχνότητα. (Διαδίκτυο: <http://www.indiana.edu/~emusic/fm/fm.htm>)



Εικόνα 4 Αύξηση του συντελεστή διαμόρφωσης και σταδιακή εμφάνιση και αύξηση των πλευρικών συχνοτήτων

Η εικόνα 4 δείχνει τις συνέπειες μιας αύξησης του συντελεστή διαμόρφωσης. Όταν $I = 0$ (4 a) η απόκλιση από τη συχνότητα c του φορέα είναι μηδενική, που σημαίνει ότι δεν έχουμε διαμόρφωση (modulation). Όταν τώρα το I παίρνει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός, αρχίζουν να εμφανίζονται πλευρικές συχνότητες εκατέρωθεν της συχνότητας του φορέα, οι οποίες έχουν άμεση σχέση με το διαμορφωτή (modulator) m . Όσο αυξάνεται το I , αυξάνεται και ο αριθμός των πλευρικών συχνοτήτων. Αν παρατηρήσουμε την εικόνα 4 μπορούμε να πούμε πως, καθώς αυξάνεται το I , κατά κάποιον τρόπο «αφαιρείται» ενέργεια από το φορέα και διαμοιράζεται στο διαρκώς αυξανόμενο αριθμό των πλευρικών συχνοτήτων (sidebands). (Roads, 1999)

2.4 Υπολογισμός του αριθμού και της θέσης των πλευρικών συχνοτήτων (sidebands)

Ένας εύκολος τρόπος υπολογισμού του αριθμού των υπολογίσιμων πλευρικών συχνοτήτων (αυτών δηλαδή των οποίων η ένταση υπερβαίνει το 1/100 της έντασης του φορέα), είναι να προσθέτουμε τον αριθμό 1 στην εκάστοτε τιμή του I (De Poli 1983). Το συνολικό εύρος φάσματος που προκύπτει, είναι στην τιμή περίπου ίσο με το διπλάσιο του αθροίσματος της απόκλισης συχνότητας D και της συχνότητας του διαμορφωτή M (Chowning 1973). Επομένως :

$$\text{Συνολικό εύρος φάσματος FM} \sim 2 \times (D + M)$$

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφέρουμε πως λόγω της αύξησης του εύρους φάσματος συναρτήσει του συντελεστή διαμόρφωσης, η FM μπορεί να αναπαραστήσει έναν σημαντικό αριθμό ήχων φυσικών οργάνων. (Roads 1999) Όσο αυξάνεται η ένταση του κύματος του διαμορφωτή (modulator), η συχνότητα του φορέα (carrier) απομακρύνεται όλο και περισσότερο από το κέντρο της, ενώ αυξάνεται και η τιμή του I . Η θέση των πλευρικών συχνοτήτων υπολογίζεται από τον τύπο:

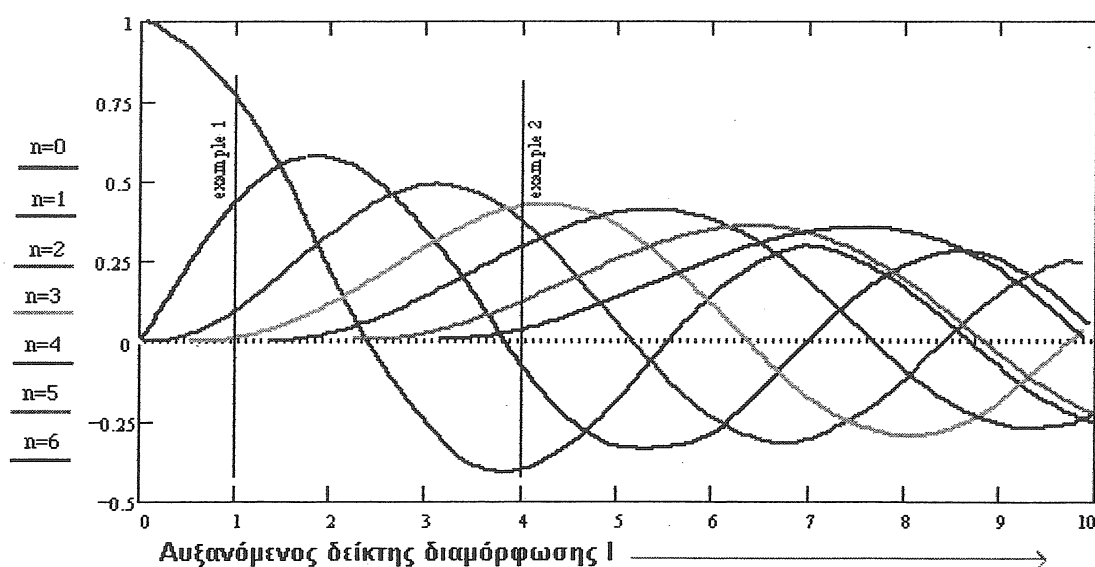
$Cf \pm nMf$. Ένα ζευγάρι πλευρικών συχνοτήτων που έχει υπολογιστεί με μία συγκεκριμένη τιμή του n , ονομάζεται ζευγάρι της νιοστής τάξης. (Hass 1995)

2.5 Υπολογισμός της έντασης των πλευρικών συχνοτήτων. Οι συναρτήσεις Bessel

Η συχνότητα του φορέα συχνά είναι η δεσπόζουσα σ' έναν ήχο FM. Στην περίπτωση αυτή, η συγκεκριμένη συχνότητα καθορίζει και το τονικό ύψος (pitch) του ήχου. Οι τεχνικοί ήχου τείνουν να δίνουν στη συχνότητα αυτή του φορέα, τον όρο «θεμελιώδης» ή «θεμέλιος» (fundamental) συχνότητα. Οι μουσικοί συνήθως αποφεύγουν αυτή την ορολογία επειδή στη μουσική ο όρος «θεμέλιος συχνότητα» συνδέεται με το τονικό ύψος, και στην FM η συχνότητα του φορέα δεν καθορίζει πάντοτε το τονικό ύψος του ήχου.

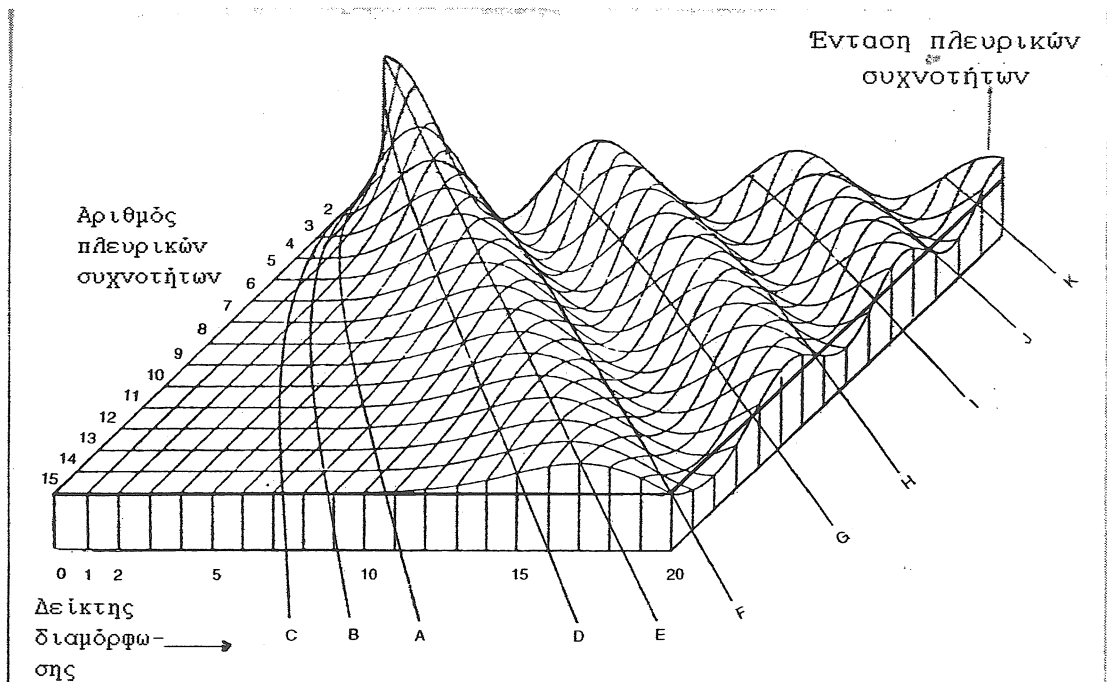
Οι εντάσεις των πλευρικών συχνοτήτων του φάσματος καθορίζονται από μια σειρά συναρτήσεων οι οποίες ονομάζονται συναρτήσεις Bessel. Όσο αυξάνεται το I , κάθε

ζευγάρι συχνοτήτων ακολουθεί δικό του τρόπο αύξησης και μείωσης της έντασής του. Οι καμπύλες των συναρτήσεων Bessel είναι διαφορετικές για κάθε ζευγάρι της νιοστής τάξης, γεγονός που κάνει την FM πολύ ενδιαφέροντα τρόπο σύνθεσης ήχου. Στην εικόνα 5 απεικονίζονται οι καμπύλες Bessel για τις πρώτες επτά σειρές του n ($n = 0$ μέχρι $n = 6$), δείχνοντας τη σχετική δύναμη των ζευγαριών των πλευρικών συχνοτήτων στον κάθετο άξονα, ενώ στον οριζόντιο άξονα παριστάνεται το αυξανόμενο I . Όπως βλέπουμε όταν το I είναι 0 (μηδενική διαμόρφωση), ο φορέας (κόκκινη καμπύλη, $n = 0$) είναι σε πλήρη ένταση. Καθώς το I αυξάνεται, συμβαίνουν διάφορα φαινόμενα. Κατ' αρχήν, ο φορέας χάνει ένταση, «αποδυναμώνεται», και δεύτερον, κάθε επιπλέον σειρά ζευγαριών πλευρικών συχνοτήτων αρχίζει να ακούγεται μία μία. Η εικόνα 6 παρουσιάζει μια τρισδιάστατη απεικόνιση των συναρτήσεων Bessel για 15 ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων (από πίσω προς τα μπροστά) καθώς αυξάνεται ο συντελεστής διαμόρφωσης (από αριστερά προς τα δεξιά). Οι γραμμές A, B και C δείχνουν τα σημεία στα οποία η ένταση πέφτει κατά 40, 60 και 80 db αντίστοιχα. Η γραμμή E δείχνει τη μέγιστη ένταση κάθε σειράς. Η γραμμές F και K δείχνουν την περιοχή όπου οι σειρές περνούν από το σημείο μηδέν και, επομένως, τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης από τις οποίες παράγονται μηδενικές εντάσεις στις αντίστοιχες πλευρικές συχνότητες. (Roads 1999)



Εικόνα 5 Καμπύλες Bessel για τις πρώτες 7 σειρές του n . (Διαδίκτυο:

<http://www.indiana.edu/~emusic/fm/fm.htm>)



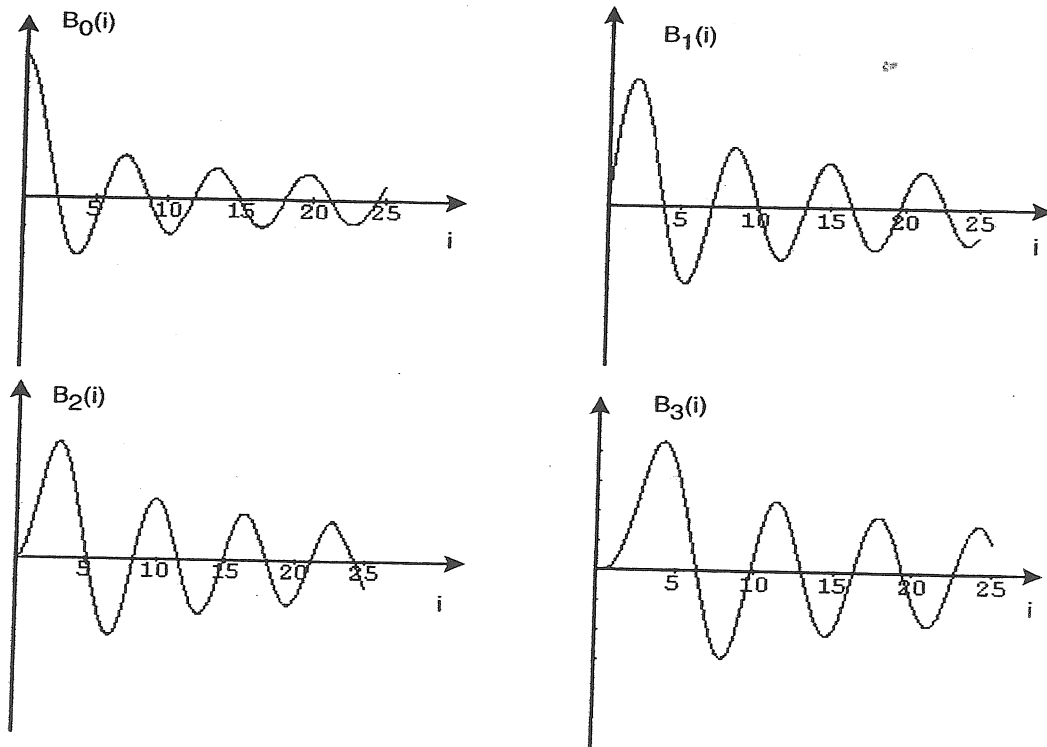
Εικόνα 6 Τρισδιάστατο γράφημα των συναρτήσεων Bessel. (Roads, 1999)

Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις Bessel για τέσσερις σειρές πλευρικών συχνοτήτων, με ξεχωριστά αυτή τη φορά γραφήματα για την κάθε σειρά. Οι συναρτήσεις, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα είναι τέσσερις. $B_0(i)$, $B_1(i)$, $B_2(i)$ και $B_3(i)$. Όπως και στην προηγούμενη εικόνα έτσι και σ' αυτήν, δε μιλάμε για απεικόνιση απόλυτης έντασης, αλλά για ποσοστό διαβάθμισης της έντασης. Το $B_0(i)$ λοιπόν αντιπροσωπεύει τη διαβάθμιση της έντασης του φορέα. Το $B_1(i)$ αντιπροσωπεύει τη διαβάθμιση της έντασης της σειράς του πρώτου ζευγαριού, το $B_2(i)$ του δεύτερου ζευγαριού, κ.ο.κ. ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το I που αυξάνεται. Επομένως για $I = 0$ βλέπουμε στο πρώτο διάγραμμα πως η βασική συχνότητα (συχνότητα φορέα) βρίσκεται στο μέγιστο της τιμής της. Επίσης, αν κοιτάξουμε τα υπόλοιπα 3 διαγράμματα των σειρών πλευρικών συχνοτήτων, θα διαπιστώσουμε πως για $I = 0$ οι τιμές της έντασης αυτών είναι μηδενικές και για τις 3 πρώτες αυτές σειρές. Είναι φυσικό, αφού όταν $I = 0$ δεν υπάρχει διαμόρφωση (modulation), επομένως δεν παράγονται πλευρικές συχνότητες. Για $I = 1$ (δε φαίνεται

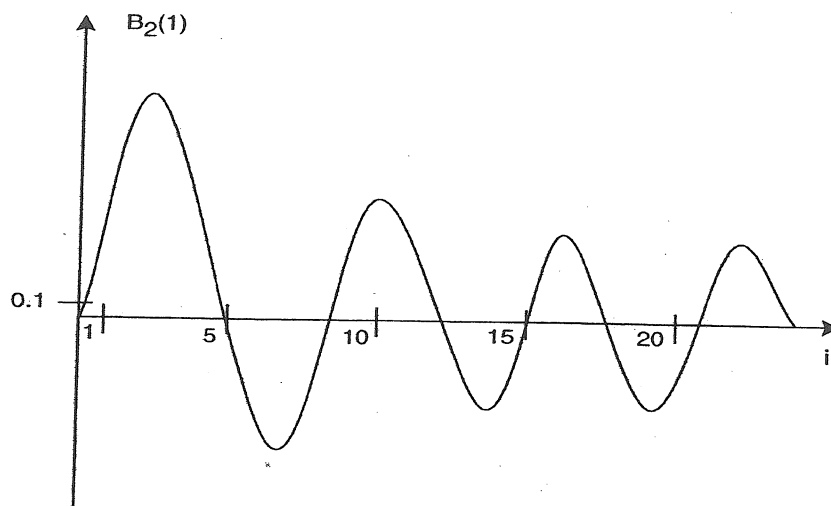
η διαβάθμιση στο διάγραμμα αλλά είναι εύκολο να το υπολογίσουμε), ο παράγοντας διαβάθμισης της έντασης του φορέα πέφτει και αντιστοιχεί στην τιμή 0.76 περίπου. Για την ίδια τιμή του I ($I = 1$) η διαβάθμιση του πρώτου ζεύγους πλευρικών συχνοτήτων αυξάνεται στο 0.44 του δεύτερου στο 0.11 κ.ο.κ. Είναι εύκολο να παρατηρήσει κανείς τόσο στην εικόνα 5 όσο και στην εικόνα 7 πως όσο αυξάνεται ο συντελεστής διαμόρφωσης I , τόσο κάνουν την εμφάνισή τους νέα ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων. Επομένως συμπεραίνουμε πως θα πρέπει να έχουμε μία αρκετά ανεβασμένη τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης προκειμένου να πετύχουμε την εμφάνιση υψηλών σειρών ζευγών πλευρικών συχνοτήτων. (Miranda 2002)

2.6 Ανακλώμενες συχνότητες και εντάσεις αυτών

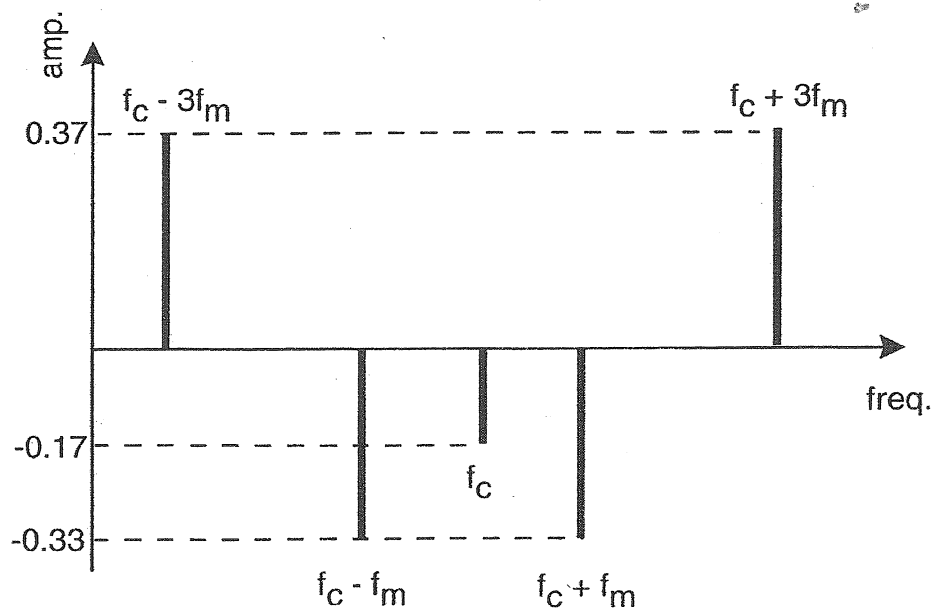
Στις συναρτήσεις Bessel οι πλευρικές συχνότητες που δημιουργούνται ενδέχεται εκτός από θετικό να έχουν και τιμές με αρνητικό πρόσημο. Αυτό εξαρτάται από το συντελεστή διαμόρφωσης. Αν για παράδειγμα $I = 5$, ο παράγοντας διαβάθμισης της έντασης του πρώτου ζεύγους πλευρικών συχνοτήτων θα είναι περίπου -0.33 . Στην ουσία, «αρνητική» ένταση δεν υφίσταται. Το αρνητικό πρόσημο εδώ καταδεικνύει πως οι συχνότητες αυτές είναι εκτός φάσματος από άποψης έντασης. Αυτό αναπαριστάνεται γραφικά με γραμμές που βρίσκονται στην περιοχή κάτω από τον άξονα x (εικόνα 9). Οι πλευρικές αυτές συχνότητες, λόγω του αρνητικού προσήμου της έντασής τους λέμε ότι βρίσκονται «εκτός φάσης» (out of phase).



Εικόνα 7 Ποσοστό διαβάθμισης έντασης για 4 ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων, όσο αυξάνεται ο συντελεστής διαμόρφωσης (Miranda, 2002)



Εικόνα 8 Γράφημα συναρτήσεων Bessel για ένα συγκεκριμένο ζεύγος πλευρικών συχνοτήτων (Miranda, 2002)



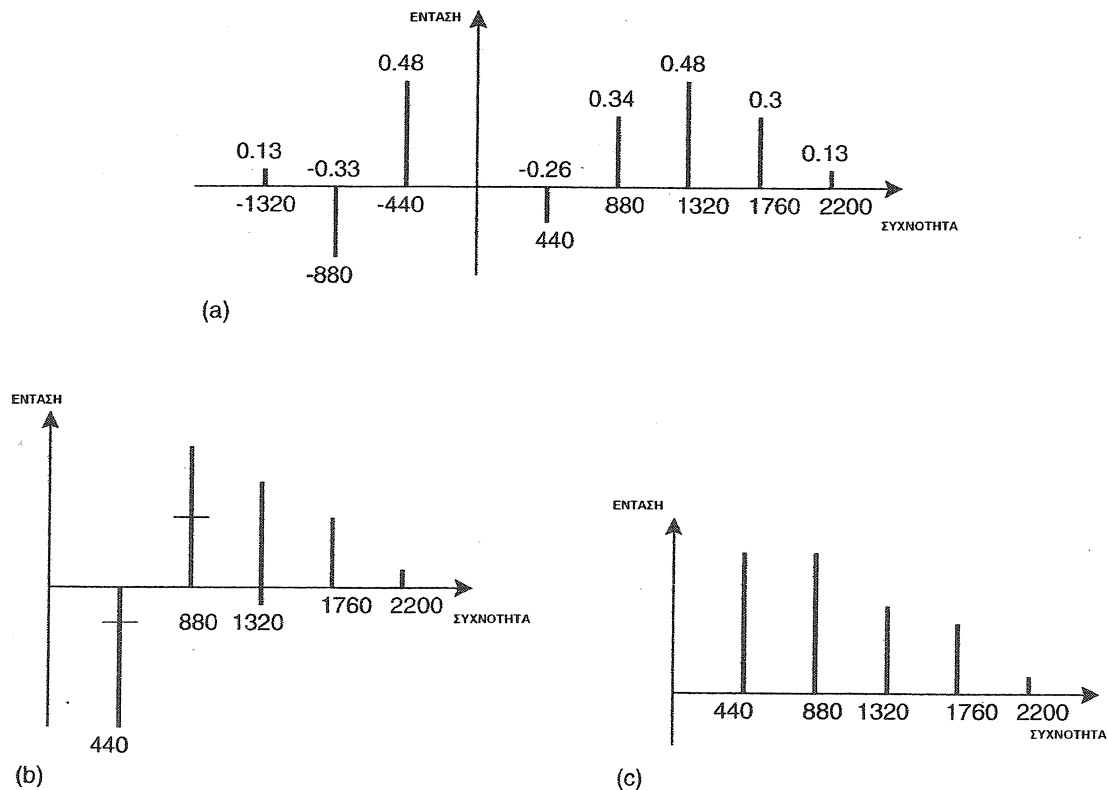
Εικόνα 9 Συχνότητες με φαινομενικά «αρνητική» ένταση απεικονίζονται στο αρνητικό πεδίο του άξονα της έντασης (Miranda, 2002)

Οι συχνότητες λοιπόν με τις αρνητικές εντάσεις δεν παράγουν ακουστικό αποτέλεσμα μεμονωμένες. Ακουστό αποτέλεσμα παράγεται μόνο εφόσον υπάρχει άλλη πλευρική συχνότητα των ίδιων Hz. Σε αυτή την περίπτωση, όπως θα δούμε παρακάτω, οι εντάσεις των συχνοτήτων αυτών αθροίζονται ή αφαιρούνται, ανάλογα με το σχετικό τους πρόσημο.

Ένα άλλο υπολογίσιμο φαινόμενο στην σύνθεση FM υφίσταται όταν η αρχική συχνότητα του φορέα είναι αρκετά χαμηλή και ταυτόχρονα ο συντελεστής διαμόρφωσης έχει υψηλή τιμή. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να παραχθούν κάποιες συχνότητες που το πρόσημό τους είναι αρνητικό, βρίσκονται δηλαδή στο αρνητικό πεδίο του φάσματος των συχνοτήτων (εικόνα 10a, αριστερά από τον άξονα της έντασης) (Miranda, 2002).

Όταν οι συχνότητες εκτείνονται λοιπόν κάτω από τα 0 Hz ανακλώνται στο φάσμα σε «μορφή αντιστροφής φάσης» (phase inverted form). Με την έκφραση αυτή εννοούμε πως αλλάζουν τα πρόσημα και των εντάσεων αλλά και των συχνοτήτων σε μια κυματομορφή. Οι αρνητικές εντάσεις και συχνότητες δηλαδή γίνονται θετικές και το

αντίστροφο. Γενικά αυτές οι συχνότητες με αρνητικό πρόσημο κάνουν τον ήχο πιο πλούσιο, αλλά εάν έχουν την ίδια απόλυτη τιμή με κάποια άλλη συχνότητα που βρίσκεται στο θετικό φάσμα, τότε μπορεί να «αλληλοεξουδετερωθούν».(roads,1999)
 Ας πάρουμε ένα παράδειγμα. Αν έχουμε συχνότητα φορέα $f_c = 440$ Hz, συχνότητα διαμορφωτή $f_m = 440$ Hz και $I = 3$ παράγονται οι ακόλουθες αρνητικές συχνότητες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 10 : - 1320 Hz,



Εικόνα 10 10 a) Οι υποτιθέμενες συχνότητες και οι εντάσεις αυτών πριν την αναδίπλωση. 10 b) Οι συχνότητες με τις εντάσεις τους μετά την αναδίπλωση, με έκδηλη σχηματικά την αλγεβρική πρόσθεση τους.

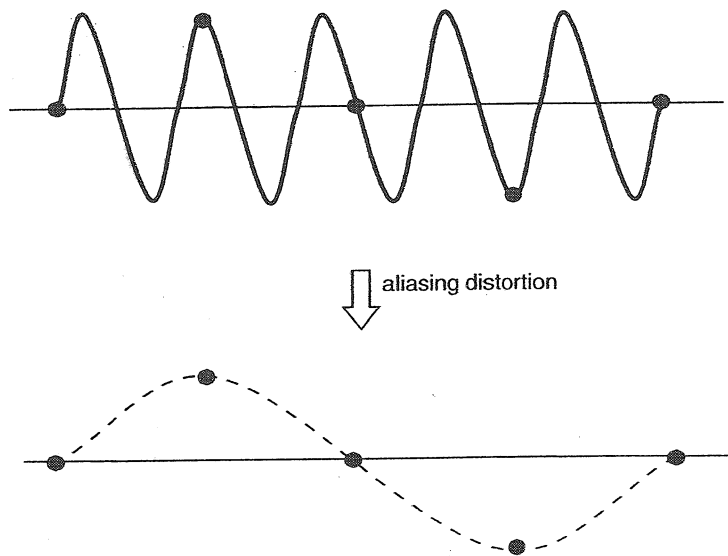
10 c) Οι πληροφορίες αναδίπλωσης δεν είναι απαραίτητο να δίνονται σε μια γραφική παράσταση. (Miranda, 2002)

- 880 Hz και - 440 Hz. Αυτές οι αρνητικές συχνότητες, μετά την αναστροφή φάσης που υφίστανται (phase inversion) «αναδιπλώνονται» αλλάζοντας πρόσημο (και πρόσημο έντασης) και προστίθενται αλγεβρικά στις ήδη υπάρχουσες συχνότητες της

ίδιας απόλυτης αξίας –αν υπάρχουν- οι οποίες βρισκόντουσαν εκεί πριν την αναδίπλωση. Βλέπουμε συγκεκριμένα πως τα -1320 Hz πήγαν στην αντίθετη πλευρά του άξονα των x , όπως επίσης και του άξονα των y . Το πρόσημο λοιπόν της συχνότητας έγινε αντίθετο, άρα θετικό, αντίθετο όμως έγινε και το πρόσημο της έντασης, άρα αρνητικό. Σαν αποτέλεσμα έχουμε τα -1320 Hz να αφαιρεθούν από άποψη έντασης, από τα 1320 Hz και να μειωθεί λίγο επομένως η ένταση της συχνότητας αυτής. Ομοίως και με τα -440 Hz. Με τα -880 Hz η μόνη διαφορά όπως βλέπουμε και στην εικόνα είναι πως εφόσον η ένταση πριν την αναδίπλωση ήταν αρνητική, μετά την αναδίπλωση αλλάζει πρόσημο και γίνεται θετική, προστιθέμενη στην προϋπάρχουσα θετική ένταση των 880 Hz (Miranda, 2002). Η αφαίρεση ή το άθροισμα αυτό των εντάσεων και των συχνοτήτων παίζει σημαντικό ρόλο στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα και γι' αυτό χρίζει ιδιαίτερης προσοχής. (Hass, 1995)

2.7 Ψευδής παραμόρφωση (aliasing distortion)

Ένας ακόμη παράγοντα που επηρεάζει το ηχητικό αποτέλεσμα στην απλή FM είναι οι συχνότητες πάνω από τη συχνότητα Nyquist. Η συχνότητα Nyquist ισούται με το ήμισυ της συχνότητας δειγματοληψίας. Για παράδειγμα, αν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 44100 Hz, τότε η συχνότητα Nyquist είναι 22050 Hz. Ο Αναλογικός προς Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC) χρειάζεται το λιγότερο δύο δείγματα ανά κύκλο κυματομορφής προκειμένου να αναπαραστήσει σωστά τη συχνότητα του ήχου. Αν αυτό δε συμβεί, αν δηλαδή έχουμε λιγότερα από δύο δείγματα ανά κύκλο, χάνονται πληροφορίες για τη συχνότητα. Τα συστήματα ψηφιακής ηχογράφησης τοποθετούν ένα φίλτρο πριν το σήμα περάσει στο μετατροπέα, προκειμένου να σιγουρευτεί ότι μόνο οι συχνότητες κάτω από τη Nyquist εισέρχονται στο μετατροπέα. Διαφορετικά, η διαδικασία μετατροπής δημιουργεί αναδιπλούμενες συχνότητες, προκαλώντας ένα φαινόμενο γνωστό ως «ψευδής παραμόρφωση» (aliasing distortion) (εικόνα 11) (Miranda, 2002)

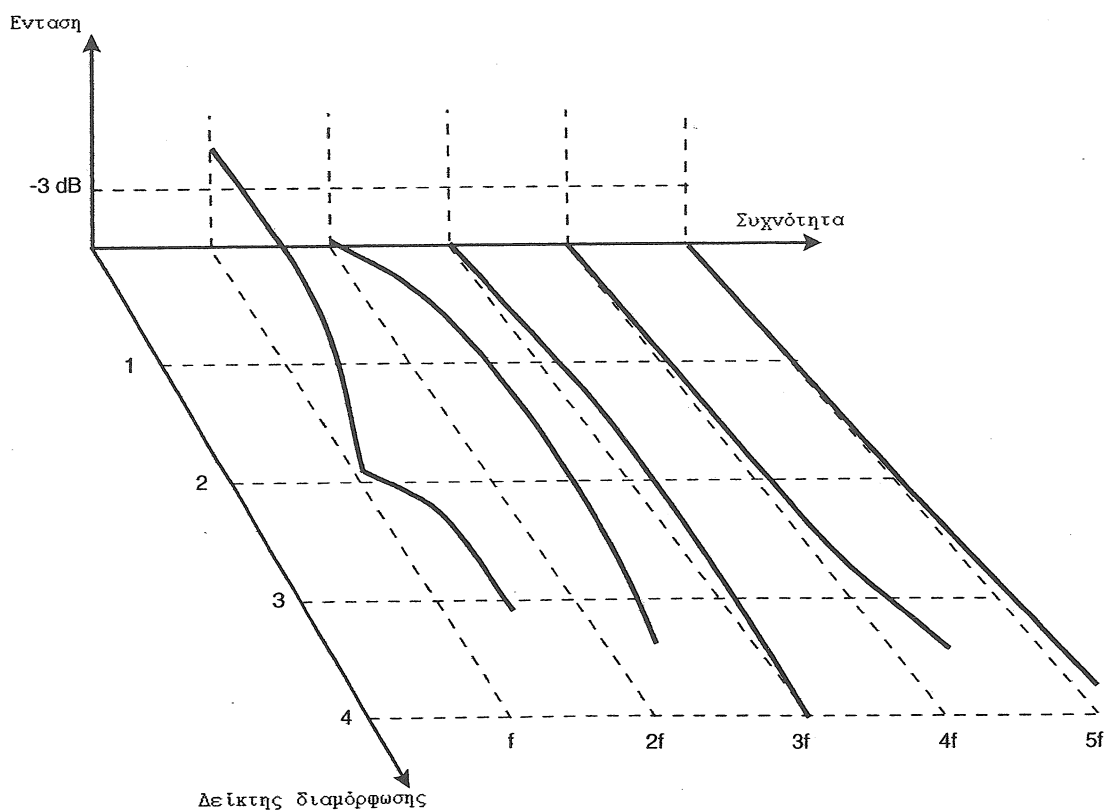


Εικόνα 11 Όταν οι συχνότητες που αναλύονται βρίσκονται πάνω από τη μισή συχνότητα δειγματοληψίας (Nyquist frequency) δημιουργούνται «ψεύτικα» δεδομένα στο σήμα του ήχου (aliasing distortion) (Miranda, 2002)

2.8 Συνθέτοντας ένα χρονικά μεταβαλλόμενο φάσμα

Η δυνατότητα να παρέχεται έλεγχος στα χρονικά μεταβαλλόμενα συστατικά του φάσματος ενός ήχου είναι μείζονος σημασίας στη σύνθεση ήχου. Για παράδειγμα, η ένταση των αρμονικών που παράγονται από τα περισσότερα φυσικά μουσικά όργανα ποικίλει στη διάρκεια του χρόνου. Οι αρμονικοί συχνά εξελίσσονται με περίπλοκους τρόπους, ιδιαίτερα κατά την ατάκα του ήχου. Αυτή η χρονική εξέλιξη του φάσματος δε μπορεί πάντοτε να γίνει αντιληπτή με σαφήνεια. Συχνά η εξέλιξη αυτή λαμβάνει χώρα σ' ένα πολύ περιορισμένο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, η διάρκεια του ίδιου του ήχου μπορεί να είναι ιδιαίτερα μικρή. Ακόμη και να συμβαίνουν όλα τα παραπάνω όμως, η χρονική εξέλιξη του φάσματος παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αναγνώριση της χροιάς και, κατά συνέπεια του ίδιου του ήχου. Η FM προσφέρει μία αποτελεσματική παράμετρο στη φασματική εξέλιξη: το συντελεστή διαμόρφωσης I .

Όπως είδαμε και παραπάνω, ο συντελεστής διαμόρφωσης καθορίζει το πλήθος των πλευρικών συχνοτήτων του φάσματος. Μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί μια περιβάλλουσα που θα αλλάζει το συντελεστή διαμόρφωσης στη διάρκεια του χρόνου προκειμένου να παραχθεί ένα άκρως ενδιαφέρον φάσμα συχνοτήτων. Αξίζει βεβαίως να παρατηρήσουμε πως αν αυξάνουμε γραμμικά το συντελεστή διαμόρφωσης δε σημαίνει πως η αύξηση των εντάσεων των υψηλών σειρών πλευρικών συχνοτήτων θα είναι και αυτή απαραίτητα γραμμική. Σημαντικό είναι να θυμόμαστε πως η εξέλιξη κάθε αρμονικού καθορίζεται από την αντίστοιχη συνάρτηση Bessel. Κατά συνέπεια, ένας συγκεκριμένος αρμονικός μπορεί να αυξάνει ή να μειώνει την έντασή του, ανάλογα με το αποτέλεσμα της συνάρτησης Bessel σε κάθε τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης I . (εικόνα 12)



Εικόνα 12 Η εξέλιξη κάθε αρμονικού καθορίζεται από την αντίστοιχη συνάρτηση Bessel (Miranda, 2002)

Ο έλεγχος της χροιάς στην FM σχετίζεται με δύο απλές αναλογίες μεταξύ κάποιων παραμέτρων της. Η πρώτη είναι η αναλογία μεταξύ της απόκλισης συχνότητας και της συχνότητας του διαμορφωτή και περιγράφηκε ήδη πιο πάνω: ορίζει το συντελεστή διαμόρφωσης. Η δεύτερη είναι η αναλογία μεταξύ της συχνότητας του φορέα και αυτής του διαμορφωτή, η αλλιώς αναλογία συχνοτήτων, και αναπαριστάται ως $f_c : f_m$. Η αναλογία συχνοτήτων χρησιμεύει σημαντικά στην υλοποίηση ενός φαινομένου κοινού στα συμβατικά μουσικά όργανα, στο να πετυχαίνει κανείς αλλαγές στο τονικό ύψος, κρατώντας αμετάβλητη τη χροιά του ήχου.

Αν η αναλογία συχνοτήτων και ο συντελεστής διαμόρφωσης ενός οργάνου απλής FM παραμένουν σταθερά ενώ μεταβάλλεται η συχνότητα του φορέα, τότε θα αλλάζει το τονικό ύψος αλλά η χροιά θα παραμένει αμετάβλητη. Σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ πιο εύκολο να σκεφτεί κανείς σε βάση αναλογιών συχνοτήτων, παρά σε σχέση με απόλυτες τιμές για τα f_c και f_m ξεχωριστά. Για παράδειγμα, ενώ είναι εύκολο να καταλάβει κανείς πως όταν $f_c = 220$ Hz και $f_m = 440$ Hz, η αναλογία είναι 1 : 2, αν όμως παρουσιάζεται ως $f_c = 465.96$ Hz και $f_m = 931.92$ Hz, τότε η αναλογία δεν είναι τόσο προφανής. (Miranda, 2002)

Μια έξυπνη και εύκολη λύση είναι να ανάγονται οι αναλογίες συχνοτήτων στην απλούστερη μορφή τους. Για παράδειγμα, 4 : 2, 3 : 1.5, και 15 : 7.5 είναι όλα ίσα με το 2 : 1. παρακάτω δίνονται μερικοί βασικοί κανόνες της σύνθεσης ήχου σε σχέση με αυτές τις απλουστευμένες αναλογίες :

1^η περίπτωση : αν f_c ισούται με έναν οποιοδήποτε ακέραιο και f_m ισούται με 1, 2, 3 ή 4, τότε η χροιά του ήχου είναι αρκετά διακριτή επειδή η συχνότητα του φορέα είναι εξέχουσα.

2^η περίπτωση : αν f_c ισούται με έναν οποιοδήποτε ακέραιο και f_m ισούται με οποιοδήποτε ακέραιο μεγαλύτερο του 4, τότε παράγονται αρμονικά ζεύγη συχνοτήτων, αλλά η αρχική συχνότητα μπορεί να μην είναι προφανής.

3^η περίπτωση : αν f_c ισούται με έναν οποιοδήποτε ακέραιο και f_m ισούται με 1, παράγεται ένα φάσμα αποτελούμενο από αρμονικούς. Π.χ. η αναλογία 1 : 1 παράγει ένα κύμα «πριονωτής» μορφής.

4^η περίπτωση : αν f_c ισούται με έναν οποιοδήποτε ακέραιο και f_m ισούται με οποιοδήποτε ζυγό αριθμό, παράγεται φάσμα με έναν συνδυασμό περιττών αρμονικών. Π.χ. η αναλογία 2 : 1 ένα κύμα «τετραγωνικής» μορφής.

5^η περίπτωση : αν f_c ισούται με έναν οποιοδήποτε ακέραιο και f_m ισούται με 3, τότε κάθε τρίτος αρμονικός στο φάσμα θα απουσιάζει. Π.χ. η αναλογία 3 : 1 παράγει περιορισμένα, «παλμικής» μορφής κύματα.

6^η περίπτωση : αν f_c ισούται με έναν οποιοδήποτε ακέραιο και f_m δεν ισούται με ακέραιο, τότε παράγονται μη αρμονικά ζεύγη συχνοτήτων. Π. χ. η αναλογία 2 : 1.29 παράγει ένα «μεταλλικό» ήχο τύπου καμπάνας. (Miranda , 2002)

Μια παρόμοια συστηματική κατηγοριοποίηση σε σχέση με τις αναλογίες $C : M$ έκανε ο Truax, ο οποίος δημιούργησε «φασματικές οικογένειες» (Truax, 1977). Όπως είδαμε λοιπόν συγκεκριμένες αναλογίες $C : M$ παράγουν αρμονικό φάσμα ενώ άλλες αναλογίες παράγουν έναν συνδυασμό από αρμονικά και μη αρμονικά φάσματα. Κάθε αναλογία $C : M$ είναι μέλος μιας «οικογένειας» αναλογιών οι οποίες παράγουν το ίδιο φάσμα , και διαφέρουν μόνο στη θέση του φορέα, γύρω από την οποία είναι επικεντρωμένη η φασματική ενέργεια (Roads, 1999).

2.9 Εκθετική (exponential) FM

Στη συνήθη ψηφιακή εφαρμογή της FM σύνθεσης, οι πλευρικές συχνότητες είναι ίσα κατανεμημένες γύρω από τη συχνότητα του φορέα. Αυτό το είδος το ονομάζουμε γραμμική (linear) FM. Παρ' όλ' αυτά, στην FM, σε κάποια αναλογικά synthesizers, η

τοποθέτηση των πλευρικών συχνοτήτων είναι ασύμμετρη γύρω από τη συχνότητα του φορέα δημιουργώντας συνολικά έναν διαφορετικό τύπο ήχου. Το φαινόμενο αυτό το ονομάζουμε εκθετική (exponential) FM. Θα εξηγήσουμε παρακάτω συνοπτικά τη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών εφαρμογών της FM σύνθεσης.

Τα περισσότερα αναλογικά synthesizers χρησιμοποιούν έναν ταλαντωτή ο οποίος ελέγχεται από ηλεκτρική τάση [voltage-controlled oscillator (VCO)], και ο οποίος τροποποιείται από έναν άλλον, ίδιου τύπου ταλαντωτή. Ο ηλεκτρικά ελεγχόμενος ταλαντωτής (VCO) ανταποκρίνεται στην τάση που του δίνουμε αυξομειώνοντας τη συχνότητά του. Συγκεκριμένα, ένας τυπικός VCO λειτουργεί μ' ένα πρωτόκολλο μίας οκτάβας ανά volt, αντιστοιχώντας στη σχέση τάσης / οκτάβας των αναλογικών keyboards. Σ' ένα τέτοιο σύστημα, για παράδειγμα, το τονικό ύψος λα (A880Hz) πετυχαίνεται με την εφαρμογή στον VCO ενός επιπλέον volt απ' ότι χρειαζόμαστε για το μίας οκτάβας χαμηλότερο λα (A440).

Στην περίπτωση της FM, ένα τροποποιούν σήμα που κυμαίνεται μεταξύ -1 volt και +1 volt, προκαλεί στον φορέα ταλαντωτή που βρίσκεται στο A440 μια κύμανση μεταξύ A220 και A880. Αυτό σημαίνει πως η τροποποίηση (modulation) υφίσταται κατά 220 Hz προς τα κάτω αλλά 440 Hz προς τα πάνω- μια ασύμμετρη δηλαδή τροποποίηση. Η μέση κεντρική συχνότητα του φορέα αλλάζει, πράγμα που σημαίνει πως η κεντρική συχνότητα (το τονικό ύψος) που αντιλαμβάνεται ο ακροατής μετατοπίζεται. Αυτή η μετατόπιση προκαλείται στην ουσία από το συντελεστή διαμόρφωσης, που σημαίνει ότι το εύρος φάσματος και η κεντρική συχνότητα είναι άμεσα συνδεδεμένα. Από μουσική πλευρά, αυτή η σύνδεση δεν είναι και τόσο επιθυμητή. Θέλουμε να έχουμε τη δυνατότητα αύξησης του συντελεστή διαμόρφωσης χωρίς να μετατοπίζεται η κεντρική συχνότητα.

Στην ψηφιακή FM, όπως είπαμε και πιο πάνω, οι πλευρικές συχνότητες κατανομούνται ίσα γύρω από τη συχνότητα του φορέα, εξ ου και ο όρος *γραμμική* FM. Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να αυξήσουμε το συντελεστή διαμόρφωσης χωρίς να έχουμε μετατόπιση της κεντρικής συχνότητας. Όλες οι ψηφιακές FM είναι γραμμικές και, τουλάχιστον ένας κατασκευαστής, ο Serge Modular, γραμμικούς αναλογικούς ταλαντωτές FM (Roads, 1999).

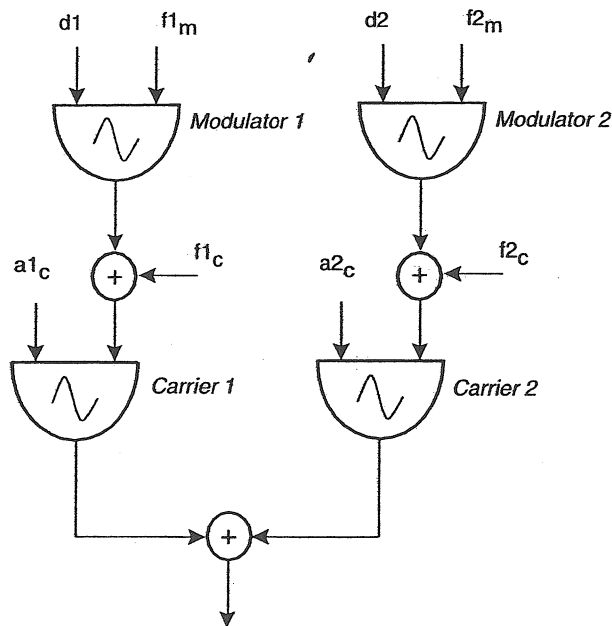
3 Σύνθετη FM

Η σύνθετη FM περιλαμβάνει δύο ή περισσότερους ταλαντωτές φορείς (carrier oscillators) και / ή δύο ή περισσότερους ταλαντωτές διαμορφωτές (modulator oscillators). Υπάρχουν πολλοί δυνατοί συνδυασμοί των ταλαντωτών αυτών, καθένας από τους οποίους θα δημιουργούσε κι έναν διαφορετικό τύπο φάσματος. Εν κατακλείδι, η σύνθετη FM παράγει πιο πλούσιο φάσμα (περισσότερες πλευρικές συχνότητες), παράλληλα όμως αυξάνεται και η περιπλοκότητα των υπολογισμών προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό φάσμα. Υπάρχουν τουλάχιστον πέντε βασικά συνδυαστικά σχήματα για τη δημιουργία ενός «ηλεκτρονικού οργάνου» σύνθετης FM :

- 1 Προσθετοί φορείς με ανεξάρτητους διαμορφωτές
- 2 Προσθετοί φορείς με έναν διαμορφωτή
- 3 Ένας φορέας με παράλληλα τοποθετημένους διαμορφωτές
- 4 Ένας φορέας με διαμορφωτές τοποθετημένους σε σειρά
- 5 «Αυτό-διαμορφούμενος» φορέας

3.1 Προσθετοί φορείς με ανεξάρτητους διαμορφωτές

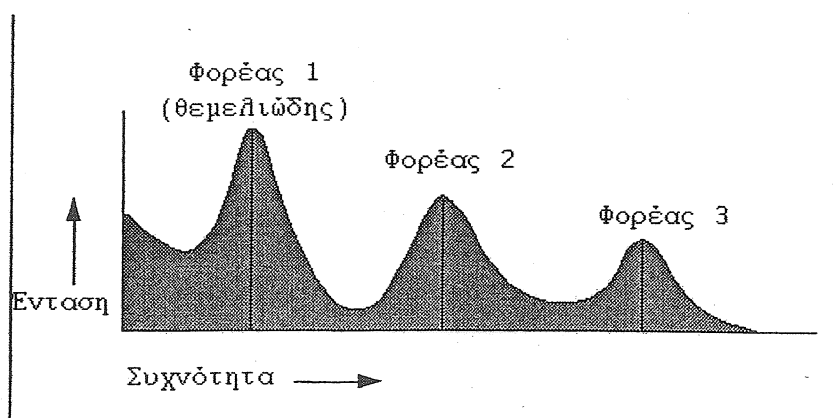
Αυτός ο τρόπος σύνθετης FM περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες κατασκευές απλής FM, σε παράλληλη διάταξη (εικόνα 13). Το φάσμα που παράγεται επομένως, είναι το αποτέλεσμα της πρόσθεσης των φασμάτων κάθε κατασκευής. (Miranda, 2002)



Εικόνα 13 Σύνθετη FM με δύο φορείς και ανεξάρτητους διαμορφωτές. (Miranda, 2002)

3.2 Προσθετοί φορείς με έναν διαμορφωτή

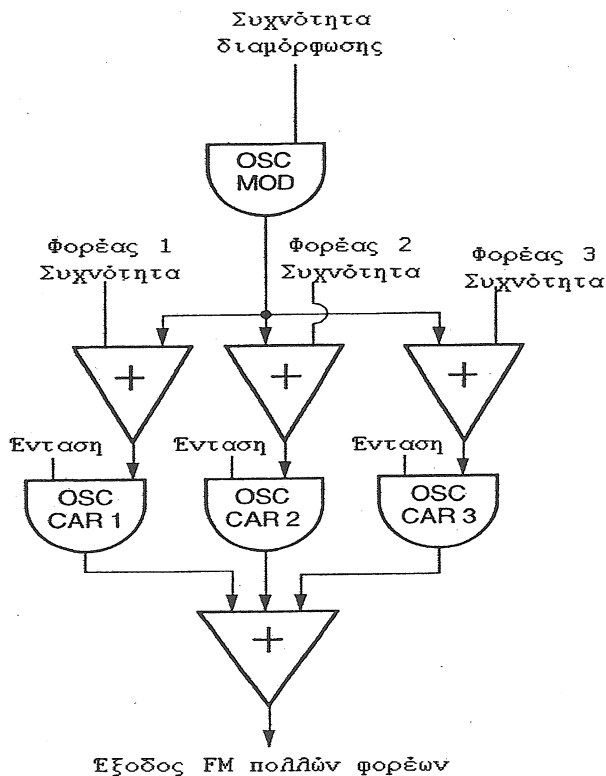
Αυτός ο τρόπος σύνθετης FM περιλαμβάνει έναν ταλαντωτή ο οποίος ταυτόχρονα «τροποποιεί» δύο ή και περισσότερους φορείς ταλαντωτές. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι κι εδώ, τα σήματα των τροποποιημένων φορέων προστίθενται σε μία σύνθετη κυματομορφή που περιλαμβάνει όλα τα προηγούμενα φάσματα



Εικόνα 14 Ένα φάσμα με τρεις κορυφές (peaks) που δημιουργήθηκαν από τρεις διαφορετικούς φορείς

Η παρουσία των πολλαπλών φορέων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κάποιων κορυφών (peaks) στο φάσμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 14. Η παρουσία τέτοιων κορυφών είναι χαρακτηριστική στα φάσματα της ανθρώπινης φωνής και των περισσότερων φυσικών μουσικών οργάνων. Ένα άλλο πλεονέκτημα που έχουν τα ξεχωριστά συστήματα φορέων, είναι πως μπορούμε να ορίσουμε διαφορετικούς χρόνους εξασθένησης για την κάθε κορυφή (formant region). Αυτό βέβαια ισχύει και για την προηγούμενη παράγραφο (πρόσθετοι φορείς με ανεξάρτητους διαμορφωτές). Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη κατά την αναπαράσταση ήχων χάλκινων φυσικών οργάνων όπου οι υψηλότεροι αρμονικοί εξασθενούν γρηγορότερα από τους χαμηλότερους.

Η εικόνα 15 δείχνει ένα σύστημα FM με τρεις φορείς και έναν διαμορφωτή. Προκειμένου να καταδειχθεί καθαρά η δομή των πολλών φορέων, η εικόνα παραλείπει τα χειριστήρια περιβάλλουσας.



Εικόνα 15 Σύστημα τριών φορέων οι οποίοι τροποποιούνται από έναν μόνο ταλαντωτή.

Μουσικές εφαρμογές της MC FM

Οι καταγεγραμμένες εφαρμογές της MC FM είναι εκείνες στις οποίες γίνεται προσπάθεια για αναπαράσταση ήχων παραδοσιακών μουσικών οργάνων. Με την MC FM - ή οποιαδήποτε τεχνική σύνθεσης ήχου σε αυτή την περίπτωση - το μυστικό της ρεαλιστικής αναπαράστασης είναι η προσοχή στη λεπτομέρεια σε όλα τα στοιχεία του ήχου - ένταση, συχνότητα, φασματικές περιβάλλουσες, vibrato και μουσικό περιβάλλον. Μια απλή εφαρμογή της MC FM είναι η σύνθεση ήχου τρομπέτας. Η ανάλυση των Risset και Mathew's στην προσομοίωση ήχων τρομπέτας δείχνει ένα σχεδόν αρμονικό φάσμα, ένα χρόνο αύξησης 20 - 25 ms για την περιβάλλουσα της έντασης (με τους υψηλής τάξης αρμονικούς να αυξάνονται με πιο αργό ρυθμό), μια

μικρή, σχεδόν τυχαία, διακύμανση συχνότητας, και ένα formant peak¹ στην περιοχή των 1500 Hz. Ο Morril ανέπτυξε τρόπους σύνθεσης ήχων χάλκινων μουσικών οργάνων με τη χρήση FM απλών αλλά και διπλών φορέων, βασισμένους στα παραπάνω δεδομένα. Ένα «ηλεκτρονικό όργανο» διπλών φορέων ακούγεται πιο ρεαλιστικό, για τον εξής λόγο: κάθε φορέας παράγει συχνότητες για διαφορετικό μέρος του φάσματος. Συγκεκριμένα, για την παραπάνω περίπτωση, ο φορέας 1 παράγει τη θεμέλιο συχνότητα και τους πρώτους 5 - 7 αρμονικούς, ενώ ο φορέας 2 έχει ρυθμιστεί στα 1500 Hz, την κύρια δηλαδή formant region της τρομπέτας. Κάθε φορέας έχει τη δική του περιβάλλουσα έντασης, προκειμένου να επιτευχθεί η ισορροπία μεταξύ των δύο συστημάτων φορέων στο σύνθετο αυτό φάσμα. Έτσι επιτυγχάνεται, για παράδειγμα, η εξέχουσα θέση από άποψη έντασης, των υψηλών αρμονικών σε έναν ήχο τρομπέτας που παίζει δυνατά.

Ο Chowning εφάρμοσε την τεχνική MC FM για την σύνθεση ήχων φωνηέντων τραγουδημένων από φωνές soprano και χαμηλού basso. Υποστήριζε πως ένας συνδυασμός περιοδικού και τυχαίου vibrato πρέπει να εφαρμοστεί σε όλες τις παραμέτρους μιας συχνότητας, προκειμένου να αναπαρασταθούν πιο ρεαλιστικά οι ήχοι της ανθρώπινης φωνής. «χωρίς το vibrato οι συντεθειμένοι ήχοι ακούγονται αφύσικα» (Chowning 1989, σελ.62). Ένα σχεδόν περιοδικό vibrato κάνει τις συχνότητες να «πλησιάζουν» ηχητικά στον ήχο της ανθρώπινης φωνής. Στις αναπαραστάσεις του Chowning η επί τοις εκατό απόκλιση vibrato (V) ορίζεται από τη σχέση:

$$V = 0.2 \times \log(\text{pitch})^2$$

Επομένως για έναν τόνο των 440 Hz, το V είναι περίπου το 1.2 τοις εκατό της συχνότητας αυτής, ή αλλιώς 5.3 Hz σε βάθος. (Roads, 1999)

¹ formant peak = formant region (βλ. Υποσημείωση σελ.22)

² log = λογάριθμος, pitch = τονικό ύψος

3.3 Ένας φορέας με παράλληλους διαμορφωτές

Αυτή η διάταξη περιλαμβάνει ένα πιο περίπλοκο σήμα για την τροποποίηση του φορέα: το αποτέλεσμα δύο ή περισσότερων απλών κυμάτων τα οποία προστίθενται (εικόνα 16). Σε αυτήν την περίπτωση, η μέθοδος υπολογισμού του φάσματος της απλής FM διευρύνεται προκειμένου να συμπεριλάβει τις πολλαπλές συχνότητες διαμορφωτών και δείκτες διαμόρφωσης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των δύο παράλληλων διαμορφωτών ταλαντωτών τα ζεύγη πλευρικών συχνοτήτων υπολογίζονται ως εξής:

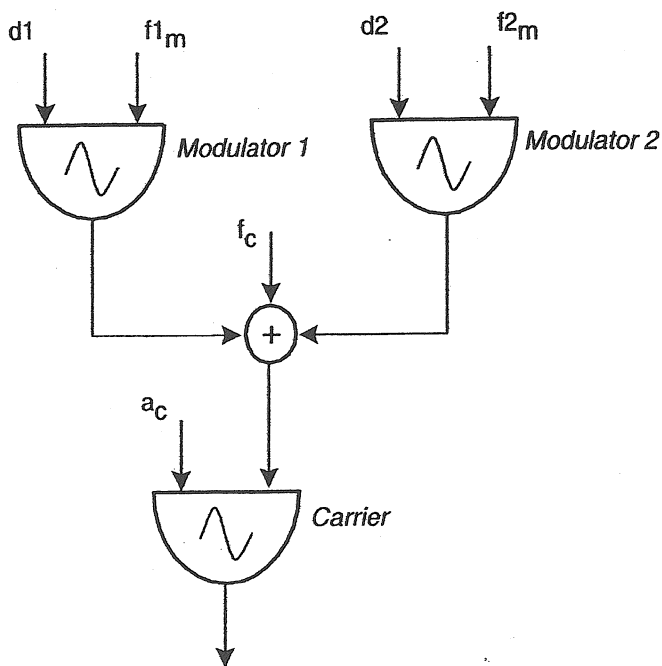
$$F_c - (k_1 \times f_{m1}) + (k_2 \times f_{m2})$$

$$F_c - (k_1 \times f_{m1}) - (k_2 \times f_{m2})$$

$$F_c + (k_1 \times f_{m1}) + (k_2 \times f_{m2})$$

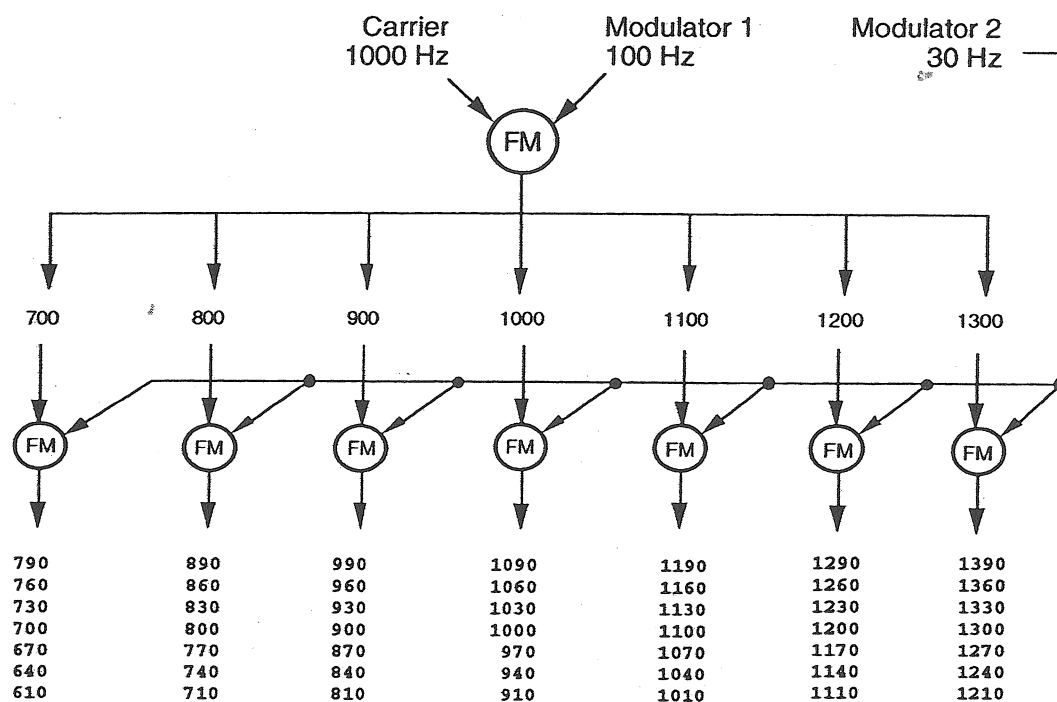
$$F_c + (k_1 \times f_{m1}) - (k_2 \times f_{m2})$$

Αυτή η φόρμουλα φαίνεται περίπλοκη αλλά στην ουσία, δηλώνει απλά πως κάθε ένα από τα ζεύγη συχνοτήτων που παράγονται από έναν διαμορφωτή ταλαντωτή (π.χ. $k_1 \times f_{m1}$) σχηματίζει έναν «τοπικό φορέα» για τον δεύτερο διαμορφωτή ταλαντωτή (π.χ. $k_2 \times f_{m2}$). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των παράλληλων διαμορφωτών, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο αριθμός των «τοπικών φορέων». Οι παράγοντες διαβάθμισης της έντασης εδώ, απορρέουν από τον πολλαπλασιασμό των επιμέρους συναρτήσεων Bessel: $B_n(i_1) \times B_m(i_2)$



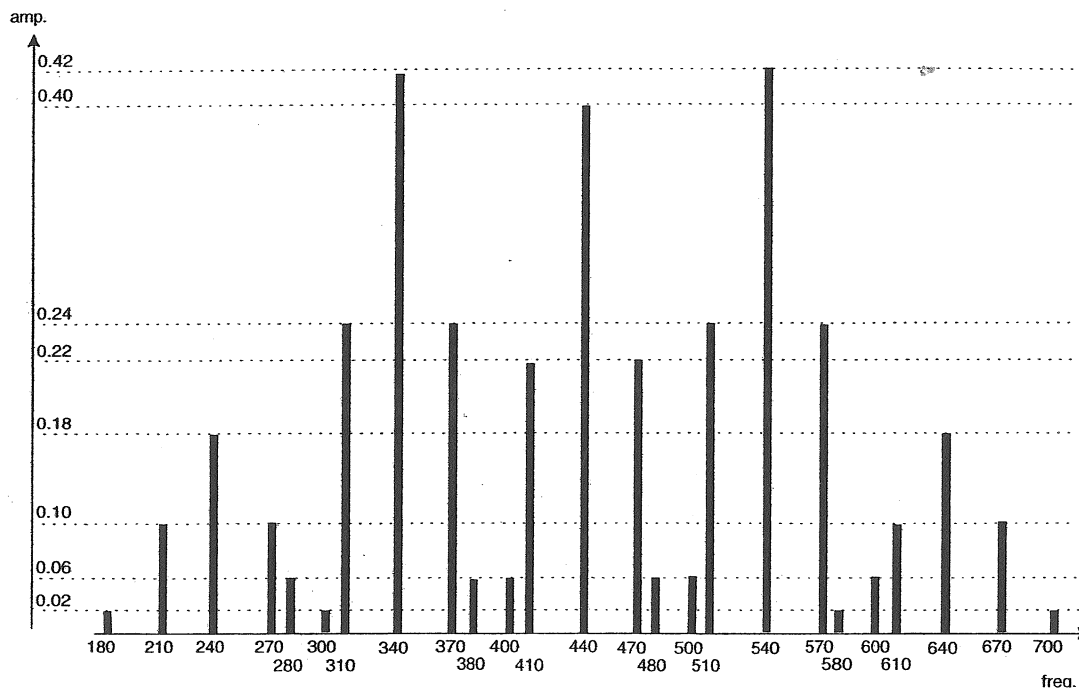
Εικόνα 16 Σύνθετη FM στην οποία χρησιμοποιείται ένας φορέας με δύο παράλληλους διαμορφωτές (Miranda, 2002).

Οι δύο επόμενες εικόνες (εικ.17, εικ.18) δείχνουν ξεκάθαρα τις συχνότητες που παράγονται από ένα σύστημα σύνθετης FM με έναν φορέα και δύο διαμορφωτές διατεταγμένους παράλληλα. Η εικόνα 19 δείχνει με λεπτομέρεια και σχηματικά, τον τρόπο με τον οποίο οι συχνότητες που παράγονται τροποποιούνται ξανά από τον δεύτερο διαμορφωτή, ενώ η εικόνα 20 απεικονίζει εκτός από τις παραγόμενες συχνότητες, και τις εντάσεις αυτών.



Εικόνα 17 Η έκρηξη στον αριθμό των αρμονικών που παράγονται από την παράλληλη MM FM³. Κάθε μία συχνότητα που προκύπτει από την τροποποίηση του φορέα 1 από το διαμορφωτή 1 τροποποιείται ξανά από το διαμορφωτή 2, παράγοντας όλες τις συχνότητες που φαίνονται με αριθμούς στο κάτω μέρος της εικόνας⁴ (Roads, 1999).

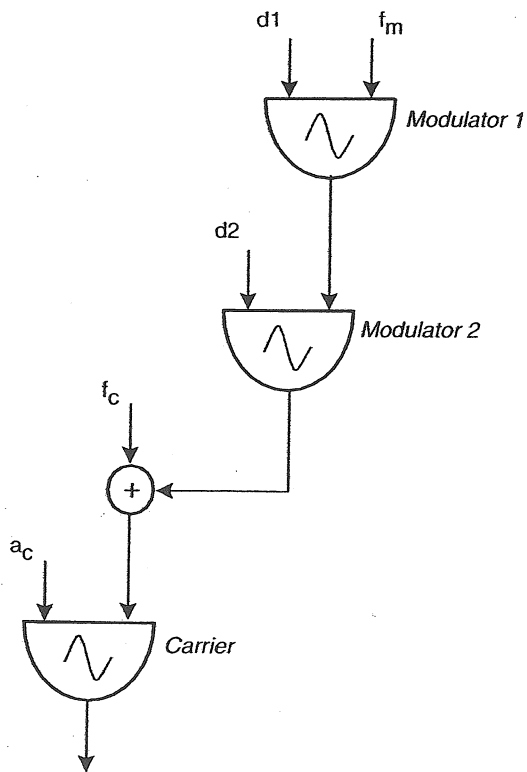
³ MM FM = Multi-modulator FM (FM με περισσότερους από έναν διαμορφωτές)



Εικόνα 18 Ένα φάσμα FM που παράγεται από έναν φορέα και δύο παράλληλους διαμορφωτές⁵

3.4 Ένας φορέας με διαμορφωτές σε σειρά

Αυτή η διάταξη επίσης περιλαμβάνει ένα πολύπλοκο σήμα για την τροποποίηση του φορέα ταλαντωτή. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, το τροποποιούν σήμα είναι ένα ήδη τροποποιημένο από έναν άλλο διαμορφωτή σήμα (εικόνα 19). Οι πλευρικές συχνότητες υπολογίζονται με βάση την ίδια μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω για τους παράλληλους διαμορφωτές, αλλά ο υπολογισμός των παραγόντων διαβάθμισης της έντασης είναι διαφορετικός. Ο πρώτος διαμορφωτής είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό του συντελεστή διαμόρφωσης του επόμενου διαμορφωτή



Εικόνα 19 Σύνθετη FM με τη χρησιμοποίηση ενός φορέα και δύο διαμορφωτών σε σειρά (Miranda, 2002).

Διαφορές συστημάτων παράλληλων διαμορφωτών με συστήματα διαμορφωτών σε σειρά

Οι κύριες διαφορές μεταξύ του φάσματος που παράγεται από διαμορφωτές σε σειρά και αυτού που παράγεται από παράλληλους διαμορφωτές είναι οι εξής:

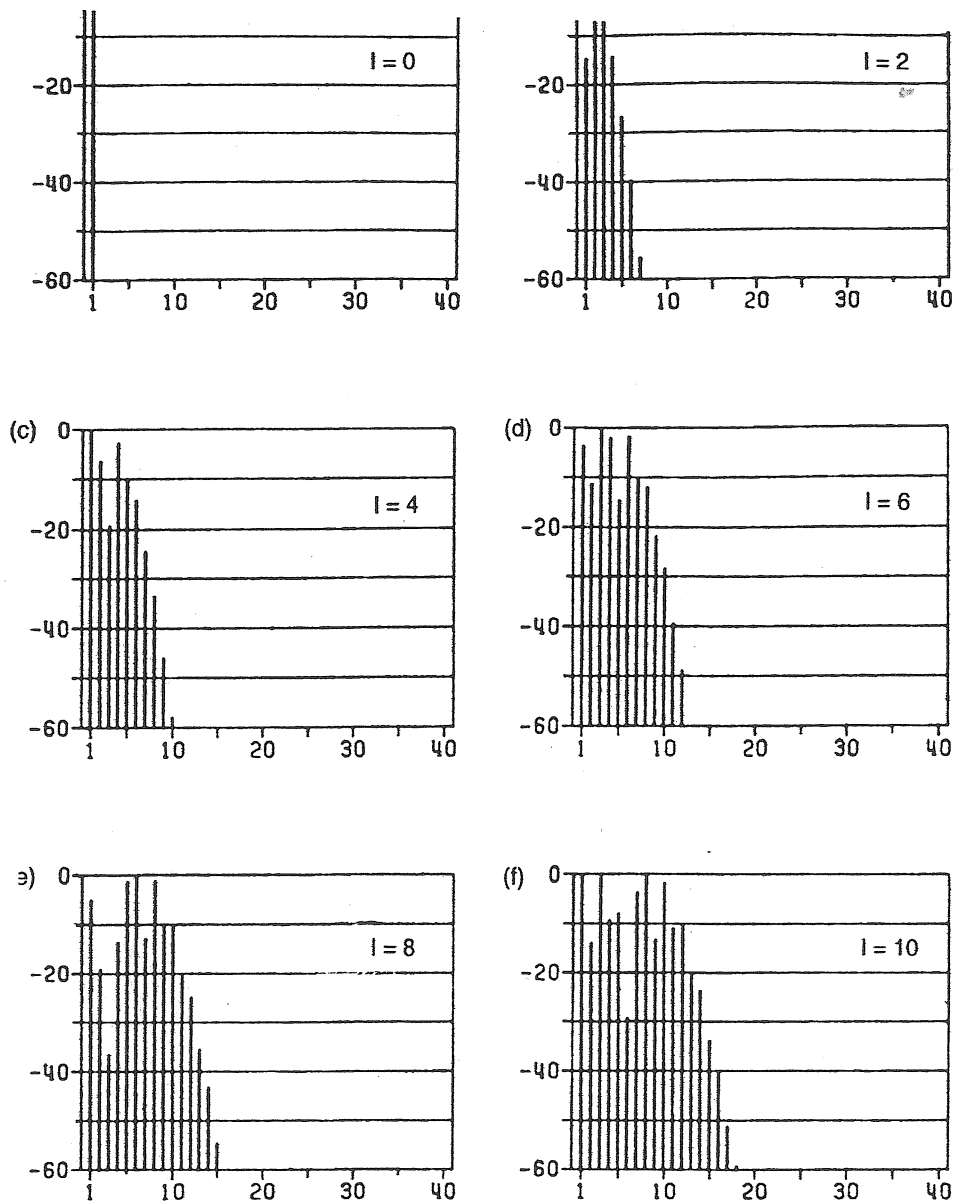
- 1) Στην περίπτωση διαμορφωτών σε σειρά παράγονται πλευρικές συχνότητες με υψηλότερη ένταση.
- 2) Στην περίπτωση διαμορφωτών σε σειρά, δεν παράγονται συχνότητες κοντά στην κεντρική συχνότητα του φορέα (Miranda, 2002).

3.5 Αναδραστική (feedback) FM

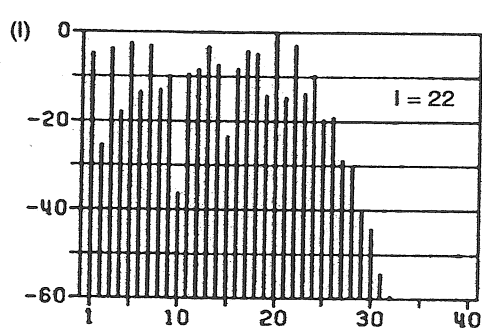
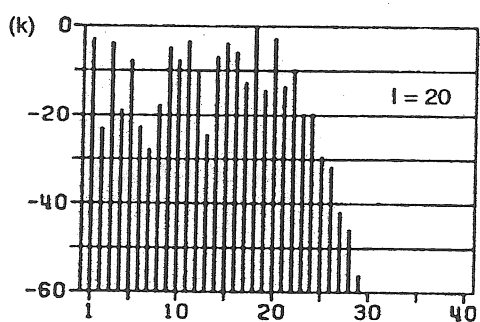
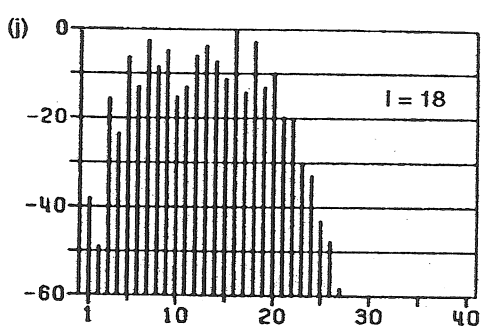
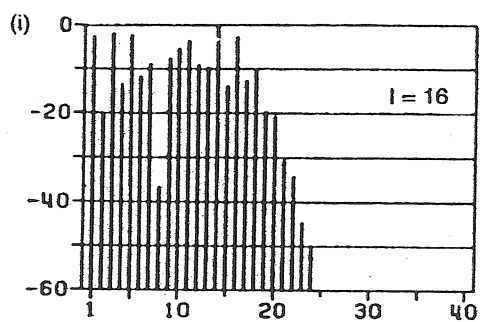
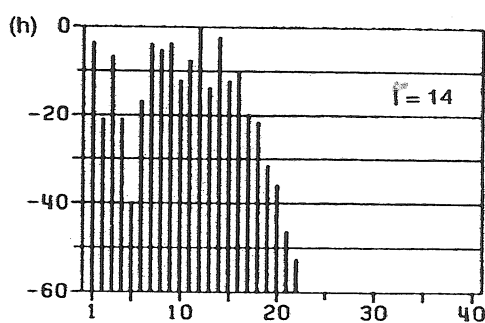
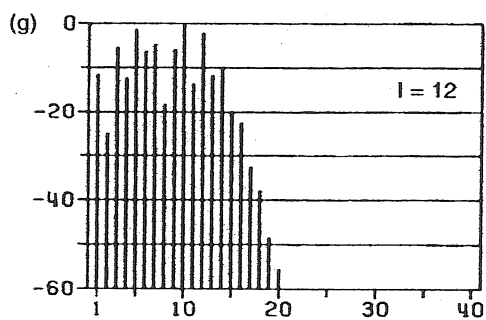
Η feedback FM είναι μία τεχνική σύνθεσης πολύ διαδεδομένη, λόγω της πατενταρισμένης χρήσης της από την YAMAHA στα ψηφιακά της synthesizers (Tomisawa 1981). Εδώ θα περιγράψουμε τρία είδη feedback FM: feedback με έναν ταλαντωτή, feedback με δύο ταλαντωτές και έμμεσο(indirect) feedback με τρεις ταλαντωτές. Η feedback FM λύνει συγκεκριμένα προβλήματα που σχετίζονται με τις απλές μεθόδους FM.

Όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης αυξάνεται στην απλή FM, οι εντάσεις των αρμονικών εξελίσσεται με μη γραμμικό τρόπο, κινούμενη προς τα πάνω ή προς τα κάτω σύμφωνα με τις συναρτήσεις Bessel (εικόνα 20). Αυτός ο «κυματισμός» στις εντάσεις των αρμονικών, προσδίδει έναν αφύσικο «ηλεκτρονικό ήχο», χαρακτηριστικό του φάσματος της απλής FM, κάνοντας την αναπαράσταση του ήχου των φυσικών μουσικών οργάνων πιο δύσκολη.

Η αναδραστική (feedback) FM κάνει το φάσμα πιο γραμμικό στην εξέλιξή του. Γενικότερα, στη feedback FM, όσο αυξάνεται ο συντελεστής διαμόρφωσης, ο αριθμός των αρμονικών καθώς και η έντασή τους αυξάνονται σχετικά γραμμικά (Roads, 1999).



Εικόνα 20 Μια γραφική αναπαράσταση του αρμονικού φάσματος της FM όταν η συχνότητα του φορέα C είναι ίση με τη συχνότητα του διαμορφωτή M , για τιμές του I που κυμαίνονται από 0 μέχρι 22. Μελετήστε τα γραφήματα ξεκινώντας από πάνω αριστερά, μετά πάνω δεξιά, έπειτα αμέσως πιο κάτω αριστερά κτλ. Προσέξτε πόσο άνισο είναι το φάσμα με την ένταση των αρμονικών να αυξομειώνεται καθώς αυξάνεται ο συντελεστής διαμόρφωσης (Roads, 1999).



Εικόνα 20 (συνέχεια)

Ιστορικό παρελθόν : Ταλαντωτές feedback

Ο πρώτος ταλαντωτής feedback έκανε την εμφάνισή του στο «Catalog of

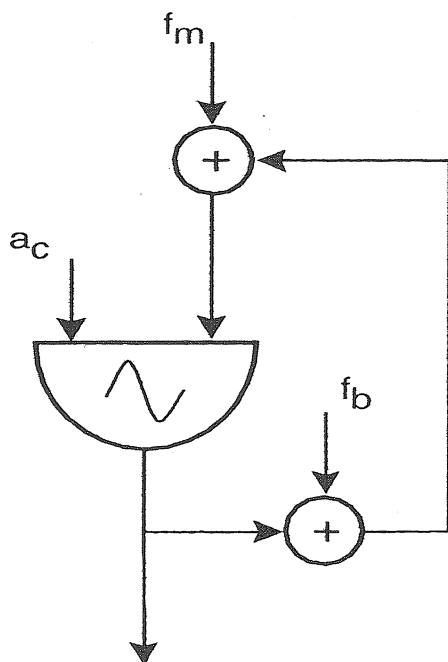
Computer Generated Sounds» του Jean-Claude Risset, το 1969. Ο κατάλογος αυτός δε διανεμήθηκε στο κοινό και επομένως η τεχνική αυτή έγινε δημοσίως γνωστή μέσω ενός περιεργού άρθρου με τον τίτλο “some idiosyncratic aspects of computer synthesized sound”. Σε αυτό, ο συγγραφέας Arthur Layzer περιέγραφε τις εργασίες στα Bell Telephone laboratories πάνω στην ανάπτυξη ενός «αυτό-ταλαντευόμενου» ταλαντωτή (self-modulating oscillator) του οποίου το output οδηγούνταν πίσω στο input του. οι εργασίες αυτές ήταν μια συνολική δουλειά των Risset, Max Matheius και F. R. Moore.

Η βασική διαφορά μεταξύ των feedback ταλαντωτών που αναπτύχθηκαν στα εργαστήρια της Bell και αυτών της τεχνικής της Yamaha είναι πως στην πρώτη περίπτωση το σήμα επανατροφοδοτείται στο input της έντασης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση πηγαίνει στο input της συχνότητας. Γι’ αυτό και οι πρώτοι feedback ταλαντωτές ήταν υλοποίηση περισσότερο της AM (Amplitude Modulation) παρά της FM (Frequency Modulation) (Roads, 1999).

3.5.1 Feedback με έναν ταλαντωτή

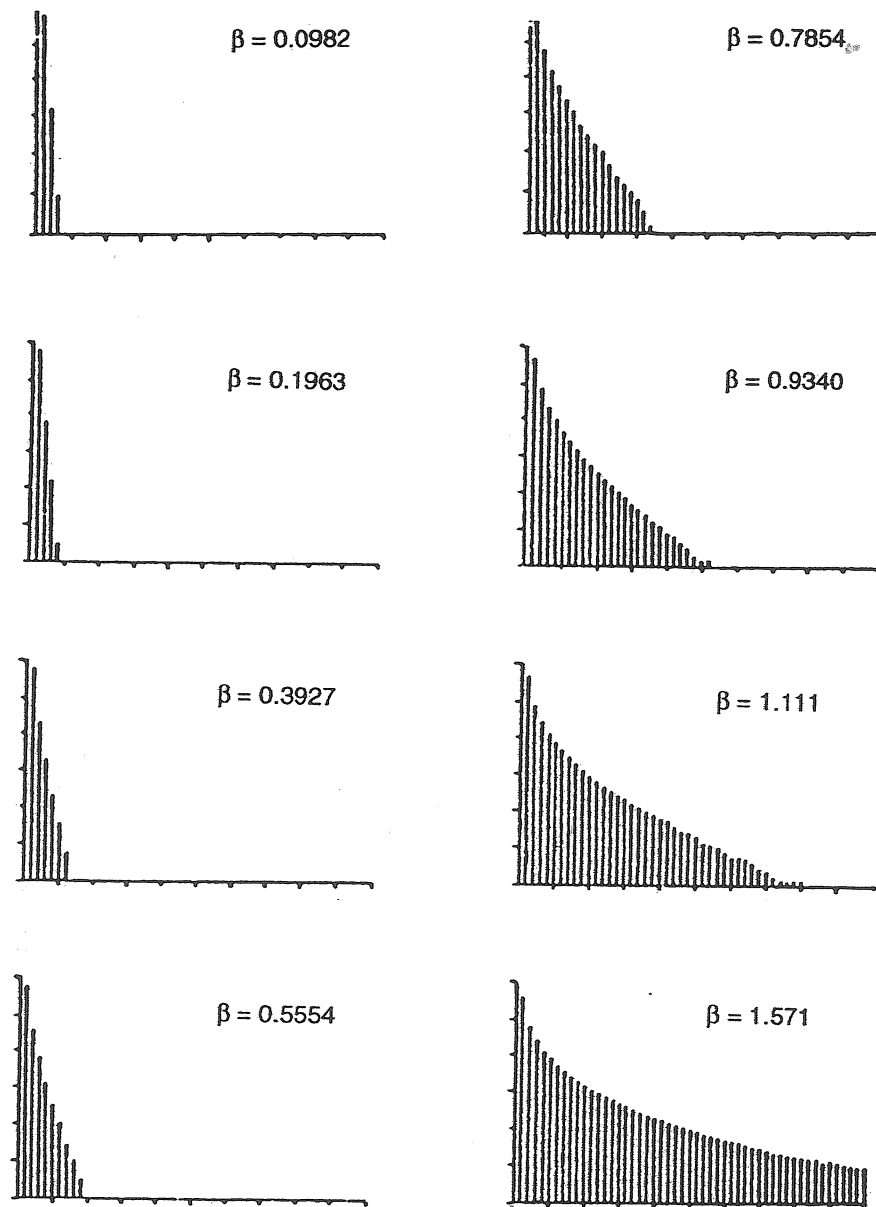
Η βασική αντίληψη του feedback με έναν ταλαντωτή είναι εύκολη στην περιγραφή. Η εικόνα 21⁶ απεικονίζει έναν ταλαντωτή που τροφοδοτεί την έξοδό του (output) πίσω στην είσοδο (input) της συχνότητας. Το σήμα της εξόδου πριν ακόμη φτάσει πίσω, πολλαπλασιάζεται από έναν παράγοντα που τον απεικονίζουμε με f_b . Το f_b δηλαδή είναι ένας παράγοντας διαβάθμισης του συντελεστή διαμόρφωσης.

⁶ Miranda 2002



Εικόνα 21 Feedback: η έξοδος ενός ταλαντωτή τροφοδοτείται στην είσοδο του ώστε να διαμορφώσει την ίδια του τη συχνότητα (Miranda, 2002).

Η εικόνα 22 δείχνει το φάσμα σ' ένα σύστημα feedback με έναν ταλαντωτή, καθώς αυξάνεται ο παράγοντας b . Μπορεί να προσέξει κανείς την αύξηση του αριθμού των αρμονικών καθώς και τις ομαλές, γραμμικές διαφορές στις μεταξύ τους εντάσεις, πράγμα που συμβάλλει στη σχεδόν γραμμική μορφή του φάσματος. Με την αύξηση του συντελεστή διαμόρφωσης το σήμα εξελίσσεται συνεχώς, και από ημιτονοειδές κύμα μετατρέπεται σταδιακά σε πριονωτό (sawtooth wave).

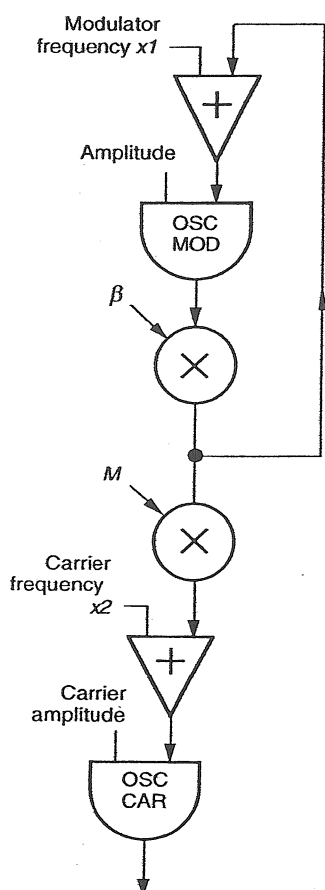


Εικόνα 22 Φάσμα ενός συστήματος *feedback* με έναν ταλαντωτή καθώς αυξάνεται το b (παράγοντας πολλαπλασιασμού του συντελεστή διαμόρφωσης) (Roads, 1999).

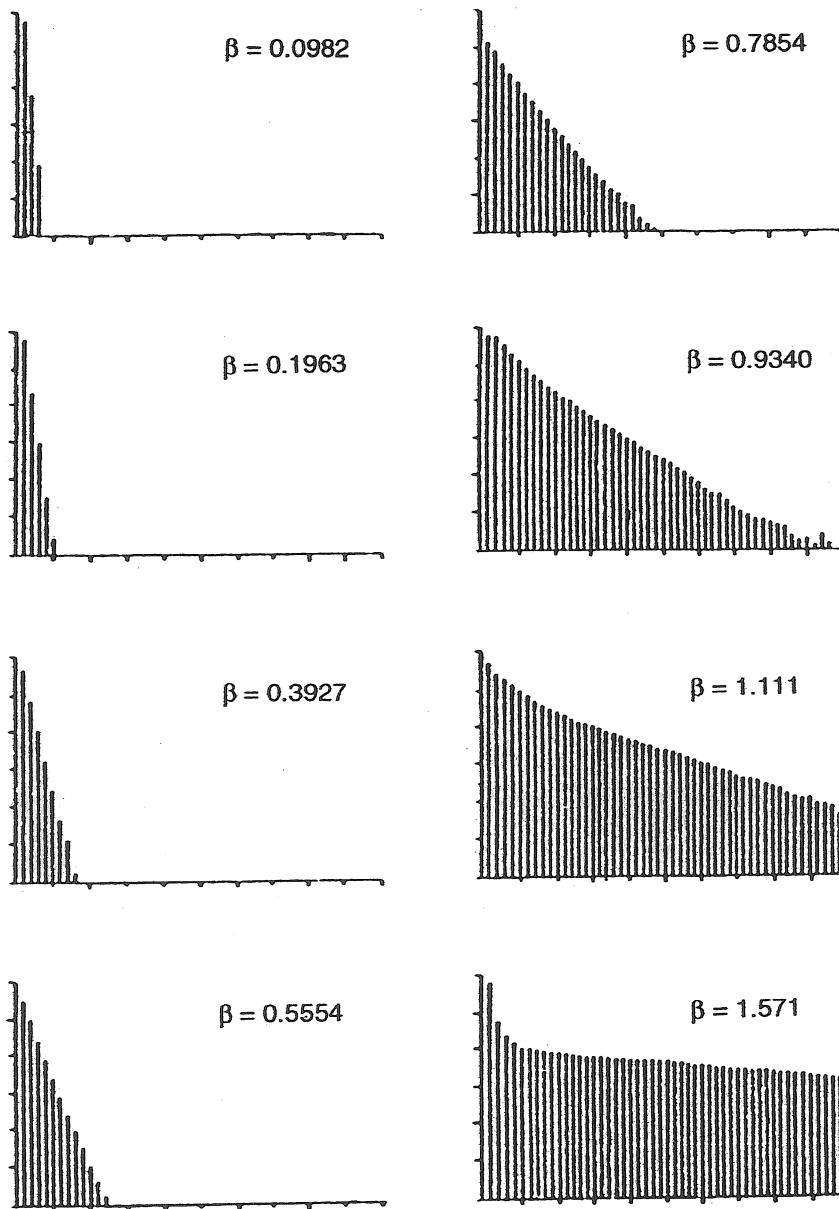
3.5.2 Feedback με δύο ταλαντωτές

Ένα άλλο σύστημα (patch) FM περιλαμβάνει έναν *feedback* ταλαντωτή, του οποίου το *output* χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση ενός άλλου απλού ταλαντωτή

(εικόνα 23). Ο πολλαπλασιαστής M στην εικόνα λειτουργεί σαν συντελεστής διαμόρφωσης ανάμεσα στους δύο ταλαντωτές. Όταν το M είναι ανάμεσα στο 0.5 και στο 2, το φάσμα όσον αφορά την ένταση των αρμονικών, έχει μια μονοτονικά κατιούσα τάση, όσο δηλαδή αυξάνεται ο αριθμός των αρμονικών τόσο μειώνεται η έντασή τους (εικόνα 24). Όταν η παράμετρος feedback b είναι μεγαλύτερη από 1, η συνολική ένταση της υψηλής σειράς αρμονικών αυξάνεται, πράγμα που δημιουργεί την εντύπωση ενός μεταβλητού φίλτρου. Ο ήχος που παράγεται στην περίπτωση αυτή είναι οξύς και διαπεραστικός. Παρ' όλ' αυτά, όταν το M είναι 1 και x_1 και x_2 είναι ίσα, παράγεται ο ίδιος ήχος που θα παραγόταν αν είχαμε ένα σύστημα feedback με έναν ταλαντωτή, σαν αυτό της εικόνας 23.



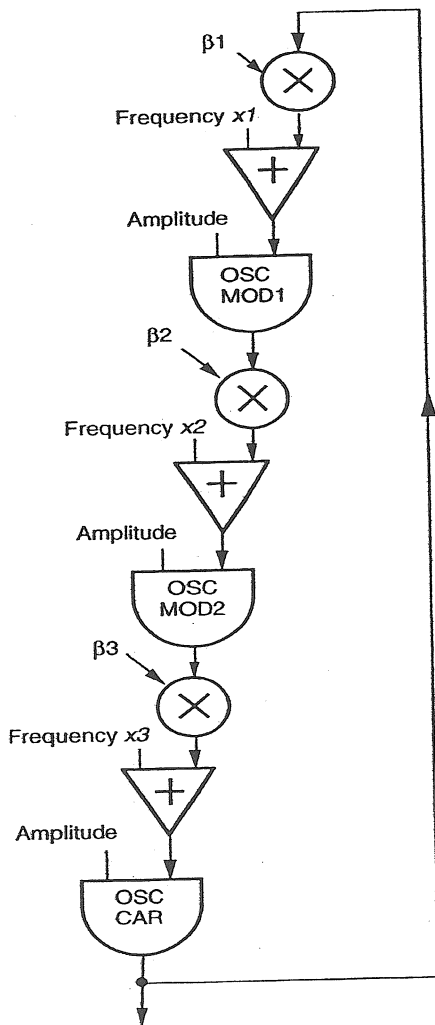
Εικόνα 23 Σύστημα feedback με δύο ταλαντωτές. Το σήμα του feedback ταλαντωτή διαμορφώνει τον απλό ταλαντωτή (Roads, 1999).



Εικόνα 24 Φάσμα που παράγεται από σύστημα *feedback* με δύο ταλαντωτές, καθώς ο παράγοντας β αυξάνεται από 0.0982 μέχρι 1.571. Οι συχνότητες $x1$ και $x2$ είναι και οι δύο 200Hz και ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι σταθερά στην τιμή 2. Ο οριζόντιος άξονας παριστάνει τη συχνότητα από 0 μέχρι 10 KHz. Ο κάθετος άξονας παριστάνει την ένταση σε μια κλίμακα από 0 μέχρι 60 dB (Roads, 1999).

3.5.3 Έμμεσο (indirect) feedback με τρεις ταλαντωτές.

Μια άλλη εκδοχή feedback FM είναι το σύστημα με τρεις ταλαντωτές και έμμεσο (indirect) feedback (εικόνα 25). Η παράμετρος του feedback εδώ είναι η β_1 . Όταν οι συχνότητες x_1 , x_2 και x_3 είναι μη ακέραια πολλαπλάσια, παράγονται ήχοι χωρίς διακριτό τονικό ύψος. Όταν δε οι συχνότητες αυτές πλησιάζουν αρκετά στο να είναι μεταξύ τους ακέραια πολλαπλάσια (αλλά δεν είναι ακριβώς), τότε παράγεται σε αρκετά έντονο βαθμό ένα εφέ chorus. Σύμφωνα με τον David Bristow (με τον οποίο ο Curtis roads ήρθε σε προσωπική επικοινωνία το 1986), η μέθοδος indirect feedback με τρεις ταλαντωτές δημιουργεί ένα πλούσιο φάσμα, ενώ όταν το feedback αυξάνεται, η ενέργεια συγκεντρώνεται περισσότερο στις υψηλές περιοχές του φάσματος.



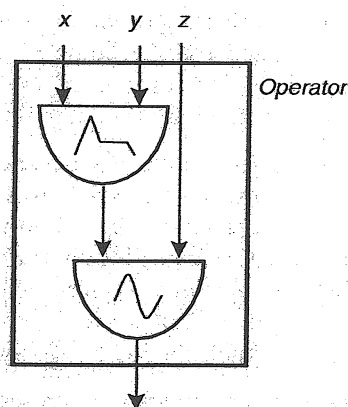
Εικόνα 25 Σύστημα indirect (έμμεσον) feedback με τρεις ταλαντωτές. Μια σειρά από τρεις ταλαντωτές ταλαντώνουν ο ένας τον άλλον. Οι τρεις παράγοντες του συντελεστή διαμόρφωσης β_1 , β_2 και β_3 καθορίζουν το μέγεθος της διαμόρφωσης. Το συνολικό output τροφοδοτείται πίσω στον πρώτο ταλαντωτή (Roads, 1999).

4 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ FM ΣΕ ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι πρακτικών εφαρμογών της FM σύνθεσης. Για παράδειγμα, μία εφαρμογή μέσω προγραμματισμού ηλεκτρονικού υπολογιστή μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική από μια εφαρμογή μέσω ενός MIDI πληκτροφόρου οργάνου (keyboard). Ενώ στην πρώτη περίπτωση έχουμε αρκετά «ευέλικτα»

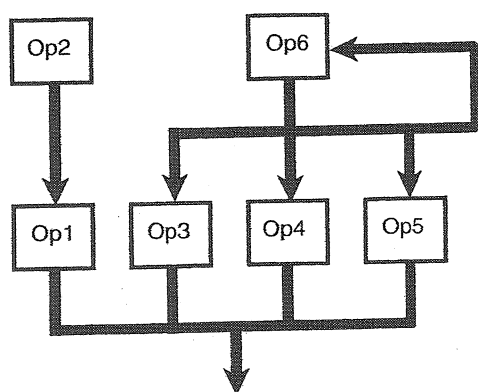
εργαλεία για το σχεδιασμό ήχου, στη δεύτερη δεν παρέχεται αυτή η ευελιξία, αλλά ο χειρισμός είναι πολύ πιο εύκολος. Σε γενικές γραμμές, η βιομηχανία των MIDI ηλεκτροφόρων synthesizers παράγει καλύτερα «επικοινωνιακά περιβάλλοντα» (interfaces) από τις ακαδημαϊκές γλώσσες προγραμματισμού με κόστος όμως την ευελιξία όσον αφορά τις δυνατότητες ελέγχου. Η Yamaha είναι μία πολύ γνωστή για την εμπορική επιτυχία των FM Synthesizers φίρμα. Η επιτυχία της αυτή πιθανότατα οφείλεται σ' ένα έξυπνο βιομηχανικό σχέδιο: οι βασικοί μηχανισμοί της FM έχουν ενσωματωθεί σε υψηλότερου επιπέδου ηλεκτρονικές υπομονάδες, τους επονομαζόμενους operators. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια, ο χρήστης έχει πρόσβαση σ' έναν περιορισμένο αριθμό παραμέτρων για τον έλεγχο των operators. Για παράδειγμα, ο συντελεστής διαμόρφωσης δεν είναι σαφώς διαθέσιμος προς προσαρμογή από το χρήστη.

Ένας operator βασικά αποτελείται από μία γεννήτρια περιβάλλουσας (envelope generator) και έναν ταλαντωτή, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως φορέας operator (carrier operator), η ως διαμορφωτής operator (modulator operator) (εικόνα 26). Τα synthesizers προγραμματίζονται μέσω της κατάλληλης διασύνδεσης ανάμεσα στους operators, προκειμένου να σχηματιστεί αυτό που ονομάζουμε *αλγόριθμος*. Μπορούμε λοιπόν να προσδιορίσουμε και να κατασκευάσουμε τον ήχο διαφόρων φυσικών μουσικών οργάνων με το να ορίσουμε τις κατάλληλες παραμετρικές αξίες για συγκεκριμένες τοπολογίες αλγορίθμων (εικόνα 27).



Εικόνα 26 Ο operator ενός synthesizer τύπου DX7 βασικά αποτελείται από μία γεννήτρια περιβάλλουσας και έναν ταλαντωτή, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως φορέας ή ως διαμορφωτής (Miranda, 2002).

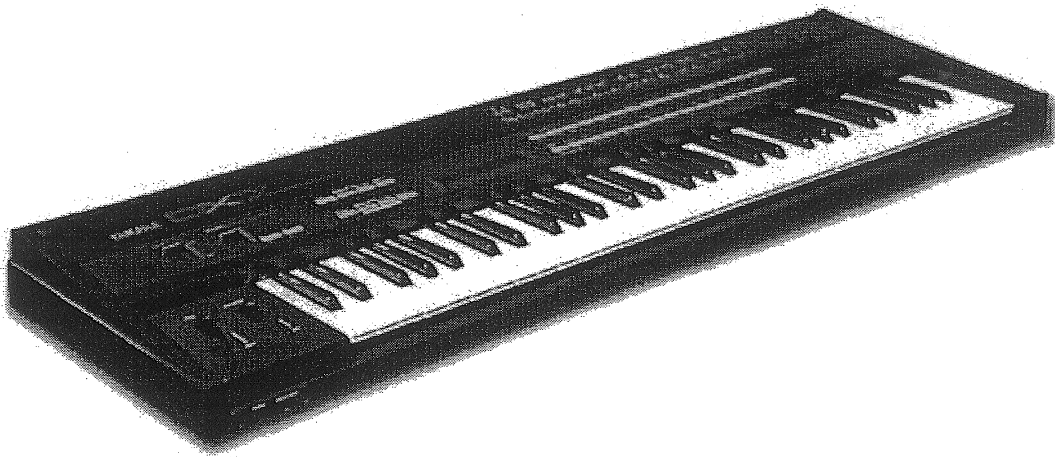
Ένας αλγόριθμος μαζί με ένα σύνολο παραμετρικών αξιών απαρτίζουν μία ηλεκτρονική σύνδεση, που ονομάζεται *patch*. Ένα σύνολο από *patches* παρέχεται στην ηλεκτρονική μνήμη ανάγνωσης (μνήμη ROM). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει στις τιμές των παραμέτρων καθώς και στον αλγόριθμο, δημιουργώντας έτσι τα δικά του *patches*. Ανάλογα με το μοντέλο του synthesizer, τέσσερις ή πέντε operators μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικών αλγορίθμων.



Εικόνα 27 Έξι διαφορετικοί operators σχηματίζουν διαφορετικούς αλγορίθμους (Miranda, 2002).

4.1 TO DX7

Μια χαρακτηριστικότερη και πολύ προσιτή εφαρμογή της FM σύνθεσης ήχου είναι το DX7, ένα synthesizer της Yamaha, το οποίο βγήκε σε παραγωγή το 1983 (εικόνα 28) (<http://www.vintagesynth.com/index2.html>).



Εικόνα 28 Το DX7

Το DX7 γεννήθηκε μετά τη συνεργασία του John Chowning με την Yamaha Corporation. Ο Chowning ήταν διευθυντής του Center for Computer Research and Musical Acoustics at Stanford University (CCRMA) και είναι στην ουσία ο εφευρέτης της FM σύνθεσης, αφού αυτός πρώτος άρχισε να πειραματίζεται με αυτήν. Γύρω στα 1973 λοιπόν, ο Chowning άρχισε να έρχεται σε επαφή με ανθρώπους της Yamaha και, τελικά, το 1975 η εταιρία πήρε επίσημα την άδεια εργασιών πάνω στην κατασκευή ενός μηχανήματος FM σύνθεσης. Αρχικά ήταν το GS1. το μειονέκτημά του όμως ήταν η τιμή του. Ήταν πολύ πιο ακριβό απ' ό,τι περίμεναν οι κατασκευαστές. Τελικά το 1983 βγήκε στην παραγωγή το DX7 σε πολύ προσιτή τιμή για το μέσο αγοραστή (περίπου 500 δολάρια μεταχειρισμένο). Ο λόγος που το GS1 ήταν πολύ πιο ακριβό, ήταν πως ήταν γεμάτο με chips από ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuit chips). Ο μεγάλος αριθμός των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (εικοσαπλάσια από τα αντίστοιχα του DX7), σύμφωνα με τον Chowning οφείλονταν στην παλαιότερη τεχνολογία τους. (<http://www.maths.abdn.ac.uk/~bensondj/html/Chowning.html>)

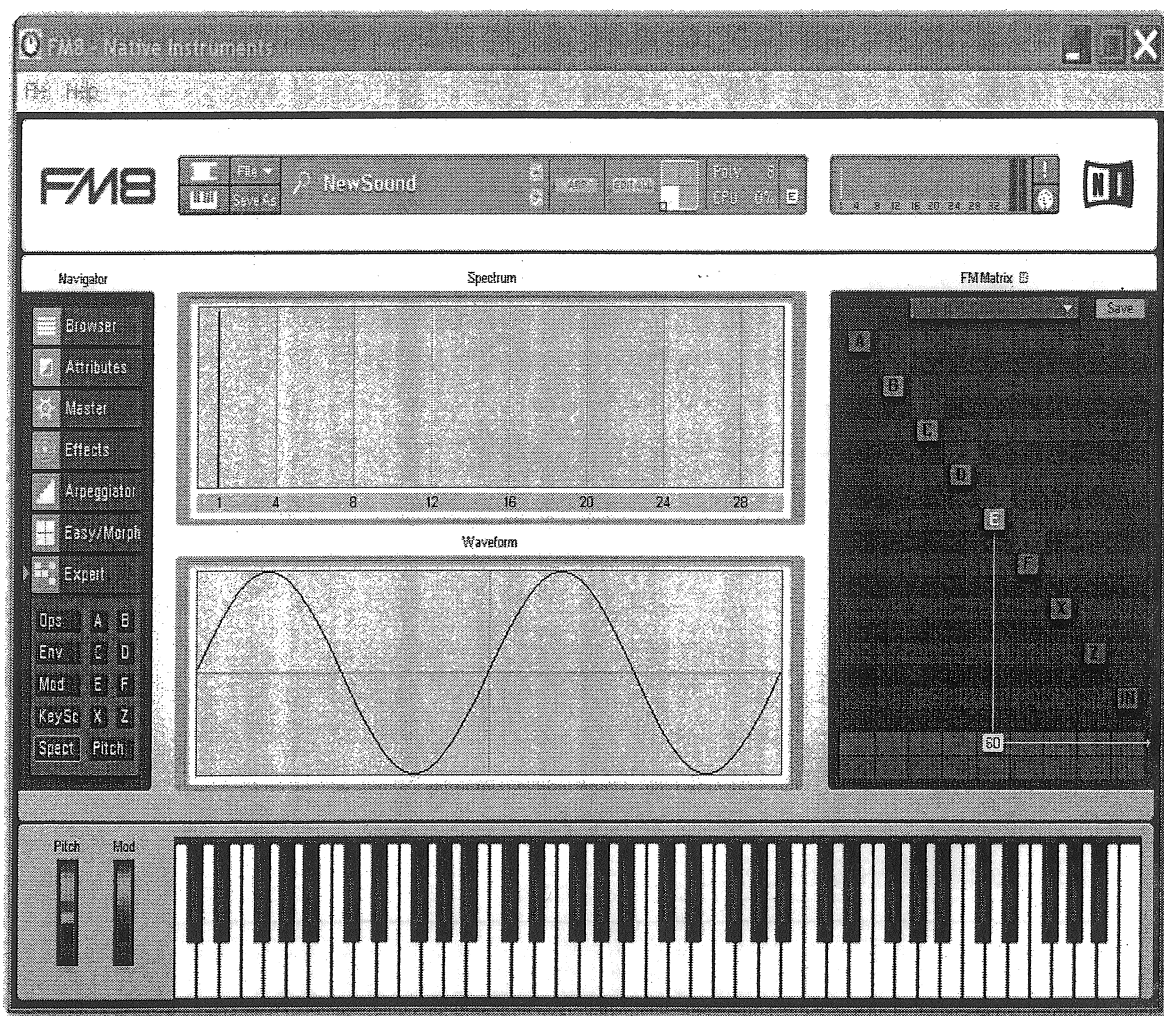
Θα ήταν σκόπιμο εδώ να αναφέρουμε πολύ συνοπτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Έχει λοιπόν έξι ταλαντωτές μαζί με τις γεννήτριες περιβάλλουσάς τους (το σύνολο ονομάζεται operator), 6 γεννήτριες περιβάλλουσας στο σύνολο, δυνατότητα μόνο μίας χροιάς, 61 πλήκτρα, δύο τροχούς για pitch bend και modulation,

ευαισθησία πλήκτρων (touch sensitivity), συνδεσμολογία MIDI, 32 μνήμες αποθήκευσης, και τιμή στα δύο χιλιάδες δολάρια. Το DX7 είναι ψηφιακό και όχι αναλογικό synthesizer, που σημαίνει πως έχει έναν μετατροπέα του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό (DAC – Digital to Analog Converter), προκειμένου να γίνει αναλογικό το σήμα πάλι στην έξοδό του. Οι πρόγονοι του DX7 ήταν το GS1 και το GS2. Δεν είχαν άσχημο ηχητικό αποτέλεσμα τα δύο αυτά μοντέλα, παρ' ότι οι ταλαντωτές ήταν χωρισμένοι σε προκαθορισμένες ομάδες φορέων και διαμορφωτών, πράγμα που σημαίνει μικρές δυνατότητες συνδυασμών, κάτι που το DX7 ξεπέρασε (<http://www.soundonsound.com/sos/aug01/articles/retrofmpt1.asp>). Το DX7 είναι σταθμός στην κατασκευή τέτοιων μηχανημάτων γιατί ξεχώρισε πρώτον λόγω των μικρών διαστάσεών του, σε σχέση με τους ψηφιακούς και μη προγόνους του. Το δεύτερο χαρακτηριστικό του είναι η πολύ χαμηλή τιμή του, γι' αυτό και πούλησε πολλές χιλιάδες κομμάτια, σε αντίθεση με τις λίγες εκατοντάδες ή ακόμη και δεκάδες των λοιπών μέχρι τότε Synthesizers. Τέλος, χρησιμοποιεί κυρίως την τεχνική της FM σύνθεσης, με την οποία ένα τέτοιο μηχάνημα σύνθεσης ήχου μπορεί να καταφέρει θεαματικά αποτελέσματα με λίγους ταλαντωτές και χωρίς πολύ κόπο και σκέψη, σε σχέση με τις άλλες τεχνικές σύνθεσης που μπορεί να χρησιμοποιούσαν άλλα synth της εποχής, όπως παράδειγμα η προσθετική σύνθεση.

4.2 FM8

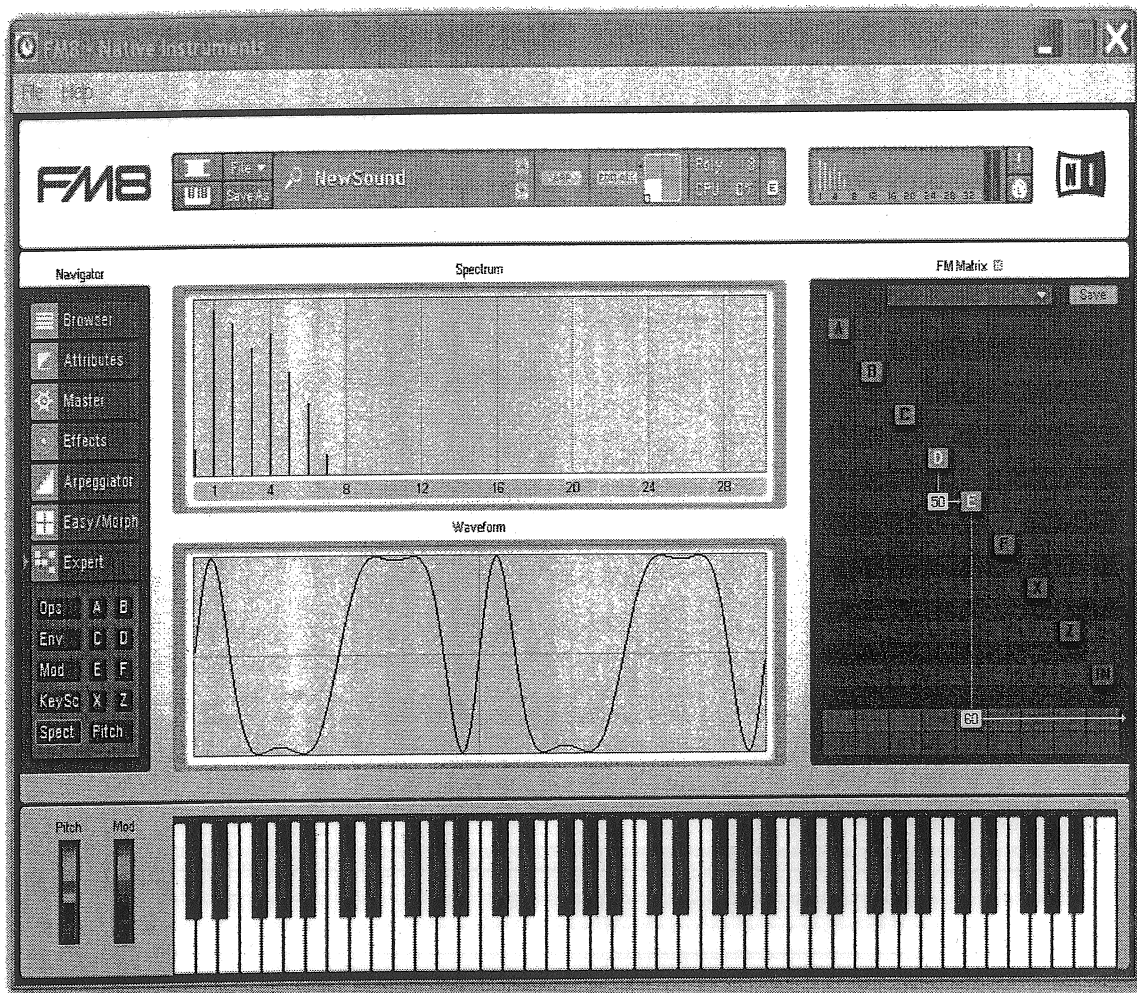
Η μεταφορά του DX7 στην οθόνη του οικιακού υπολογιστή έγινε με το FM7, του οποίου η βελτιωμένη έκδοση είναι το FM8, από τη Native instruments. Δεν είναι σκόπιμο στην εργασία αυτή να περιγράψουμε εκτενώς τις δυνατότητες και τη λειτουργία τέτοιων προγραμμάτων software, γι' αυτό και θα περιοριστούμε σε κάποιες πρακτικές εφαρμογές θεωριών που αναφέρθηκαν και αναπτύχθηκαν μέχρι εδώ, με τη βοήθεια των δυνατοτήτων των προγραμμάτων αυτών. Ας δοκιμάσουμε να δημιουργήσουμε ένα σύστημα απλής FM με δύο ταλαντωτές, και οι δύο με απλές ημιτονοειδείς κυματομορφές. Το περιβάλλον FM matrix που υπάρχει στο FM8 είναι αρκετά απλό και εύχρηστο για το μέσο χρήστη. Ενεργοποιούμε λοιπόν για

παράδειγμα τον ταλαντωτή E και τοποθετούμε την έντασή του (amplitude) στην τιμή 60. Με την επιλογή “ratio” μπορούμε να ρυθμίσουμε στην ουσία τη συχνότητα του ταλαντωτή, με τη λογική των αρμονικών. Για παράδειγμα, ratio = 1 στη θεμέλιο συχνότητα, ratio = 2 στον πρώτο αρμονικό, 3 στο δεύτερο αρμονικό κ.ο.κ. Στο παράδειγμά μας τοποθετούμε το ratio του ταλαντωτή E που επιλέξαμε στη θέση 1. Αν πατήσουμε ένα πλήκτρο, είτε με το ποντίκι είτε με το πληκτρολόγιο, ακούμε τον ήχο της απλής, ημιτονοειδούς κυματομορφής. Στην εικόνα 29 απεικονίζεται το φάσμα των συχνοτήτων (στην πάνω πλευρά της εικόνας) και η μορφή του κύματος (στην κάτω πλευρά). Όπως φαίνεται και στην εικόνα, το φάσμα είναι πολύ φτωχό, χωρίς καθόλου δευτερεύουσες συχνότητες (αρμονικούς).



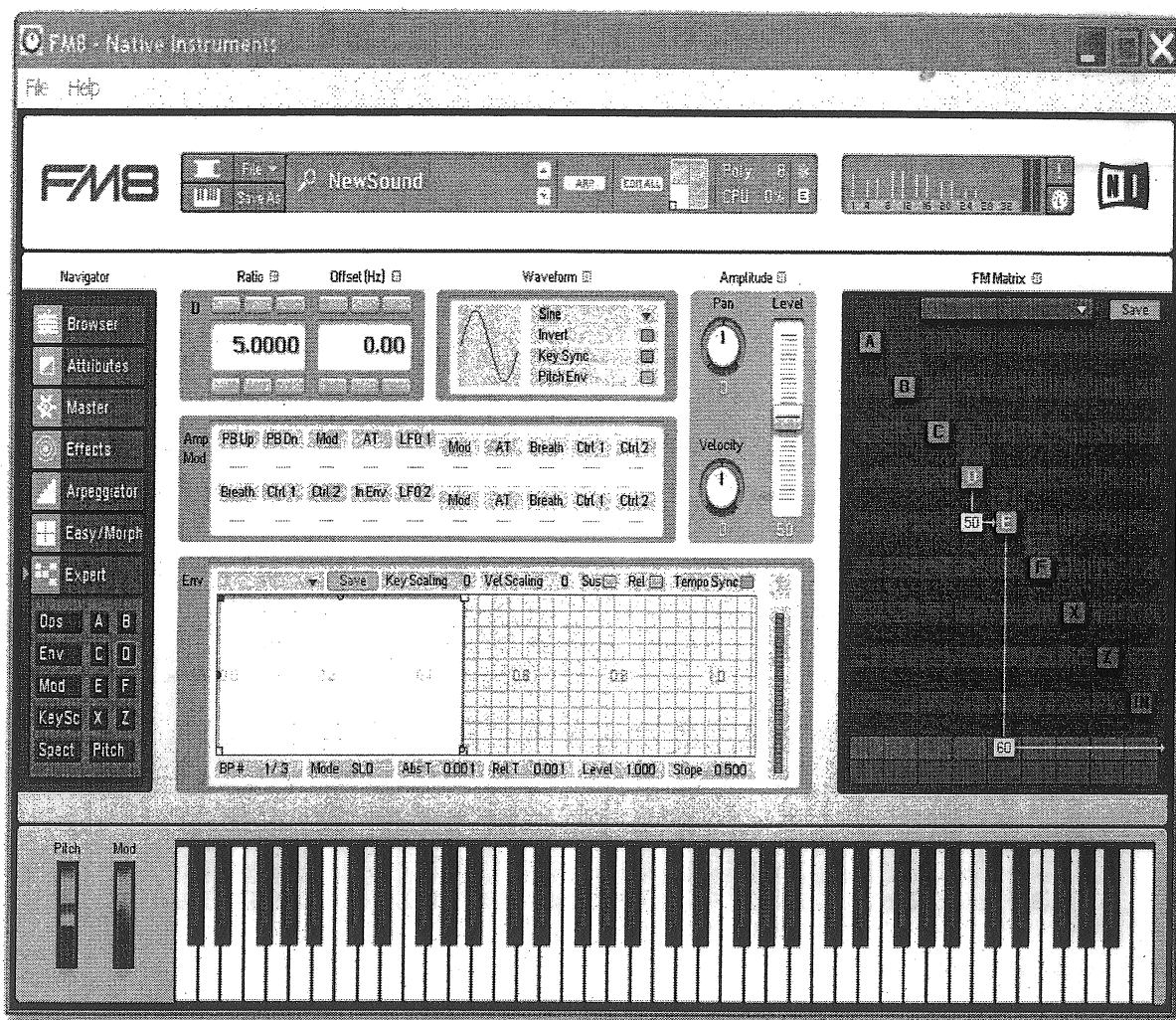
Εικόνα 29 Απεικόνιση στο περιβάλλον του FM8 της κυματομορφής και του φάσματος του σήματος ενός απλού ταλαντωτή (E)

Ενεργοποιούμε στη συνέχεια τον δεύτερο ταλαντωτή μας, που επιλέγουμε τυχαία να είναι αυτός με το γράμμα D, και αυτός με κύμα απλής ημιτονοειδούς μορφής. Στη συνέχεια στέλνουμε τον ταλαντωτή D να ταλαντώσει τον ταλαντωτή E, επιλέγοντας το ανάλογο τετράγωνο που συνδέει τους δύο ταλαντωτές και ανεβάζοντας το ποσοστό ταλάντωσης (κάτι σαν το συντελεστή διαμόρφωσης) στο 50. Στην εικόνα 30 έχουμε το φάσμα και την κυματομορφή όπως έχει δημιουργηθεί με τα νέα δεδομένα ταλάντωσης από τον ταλαντωτή D. Όπως φαίνεται στην εικόνα, έχουν προστεθεί αρμονικοί στο φάσμα, όπως επίσης έχει παραμορφωθεί το απλό ημιτονοειδές κύμα της εικόνας 29. Βλέπουμε λοιπόν την επίδραση που έχει η διαμόρφωση (modulation) ενός ταλαντωτή από έναν άλλον, όσον αφορά την κυματομορφή και το φάσμα του ήχου.

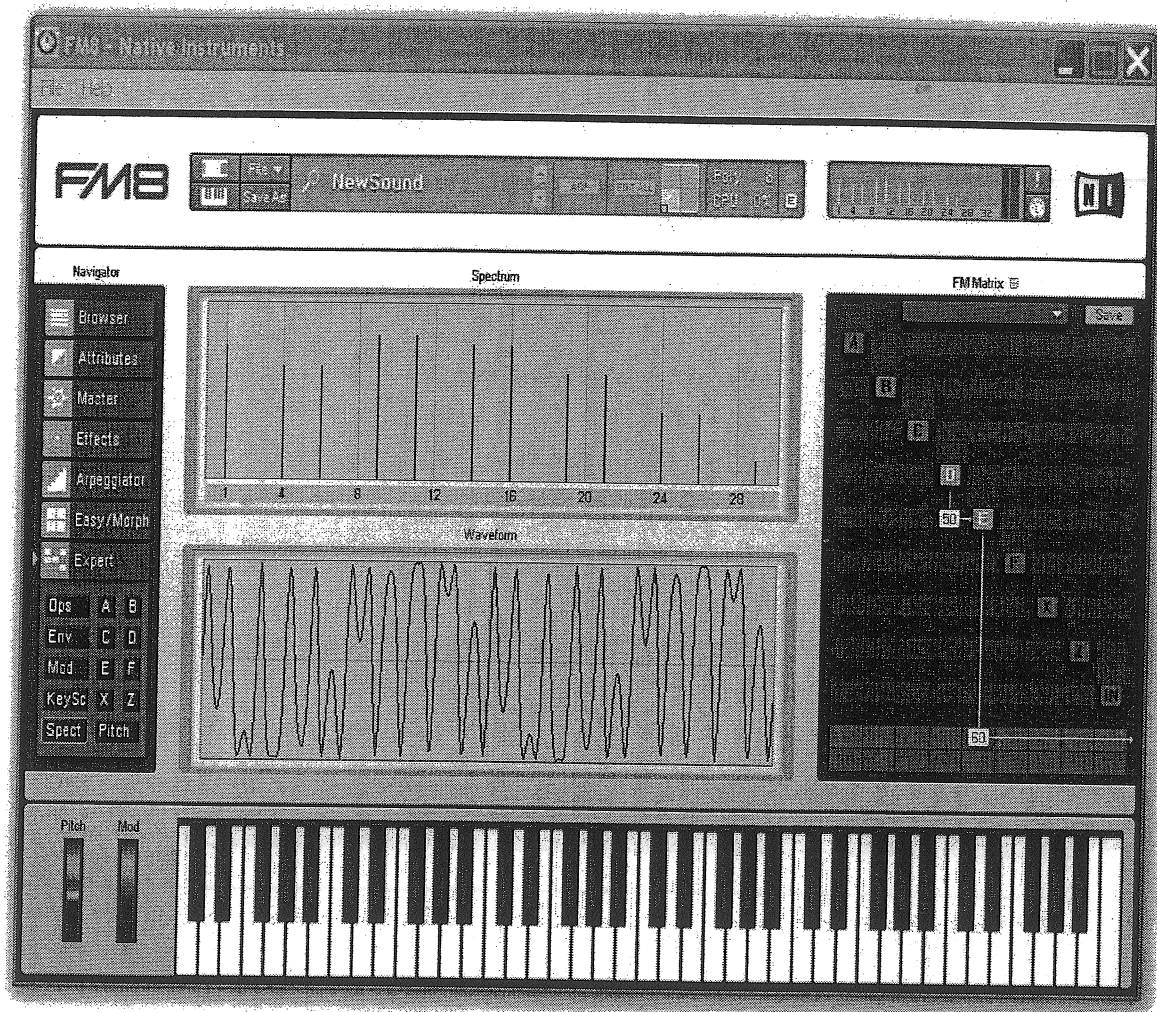


Εικόνα 30 Διαφοροποίηση φάσματος και κυματομορφής με τη διαμόρφωση του ταλαντωτή E από τον ταλαντωτή D.

Όπως είμαστε, χωρίς να πειράζουμε τίποτα, αλλάζουμε τη συχνότητα του ταλαντωτή D, μέσω της επιλογής ratio. Επιλέγουμε να τοποθετήσουμε το ratio από τη θέση 1 στη θέση 5, που σημαίνει αλλαγή της συχνότητας του ταλαντωτή D σε αυτή του τέταρτου αρμονικού (εικόνα 31). Στην εικόνα 32 βλέπουμε πως έχουν προστεθεί πλέον ακόμη περισσότεροι αρμονικοί στο φάσμα, καθώς επίσης πως η κυματομορφή έχει αλλοιωθεί ακόμη περισσότερο και πως το μήκος κύματος στο τελικό σήμα έχει μικρύνει, πράγμα που σημαίνει πως η κεντρική συχνότητα έχει αυξηθεί, ακούγονται λοιπόν σίγουρα μέσα στον ήχο και υψηλότερες συχνότητες.



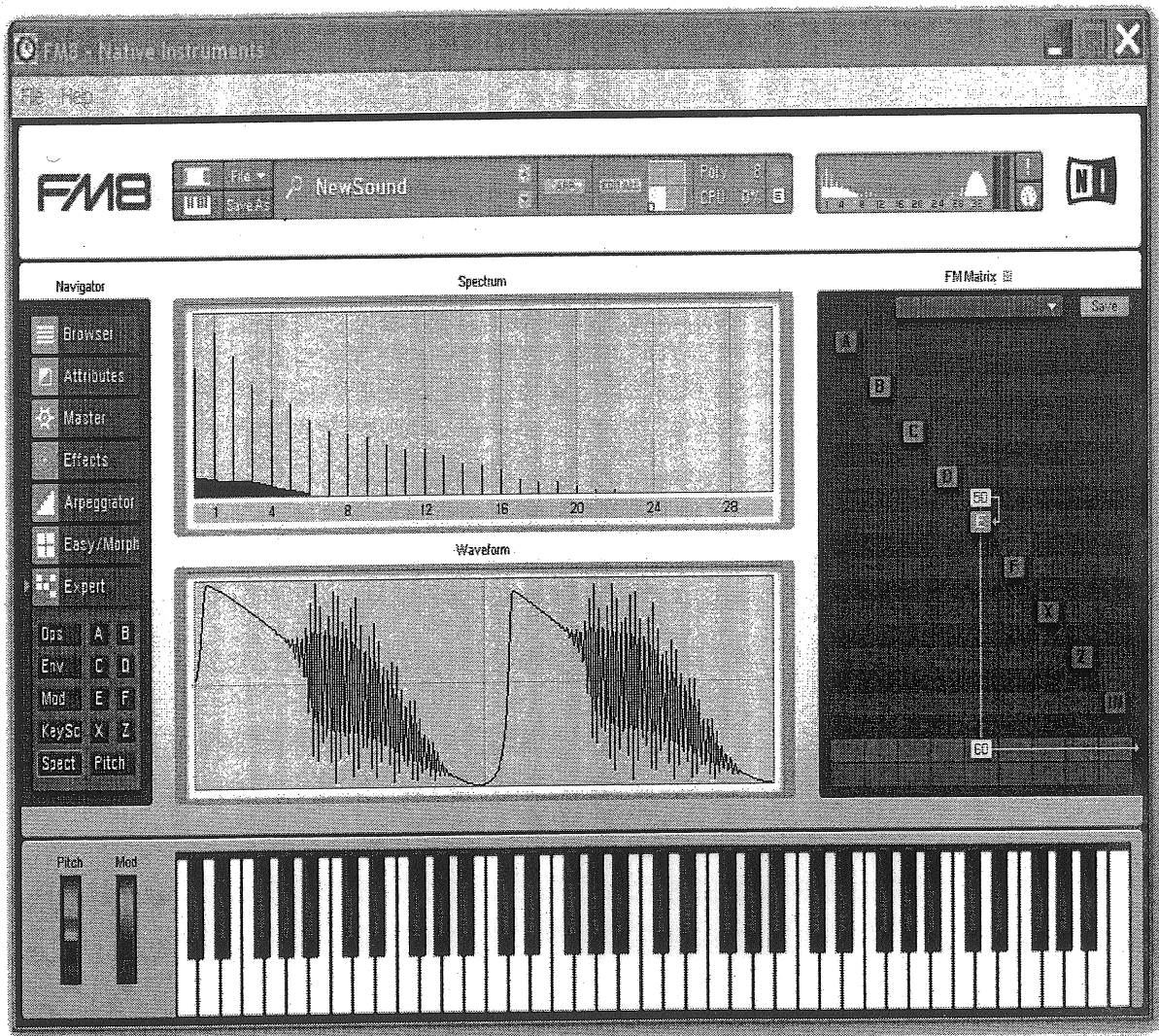
Εικόνα 31 Τοποθετούμε την επιλογή Ratio του ταλαντωτή D στην τιμή 5. Αυτό σημαίνει στην ουσία αλλαγή της συχνότητας ταλάντωσης του D.



Εικόνα 32 Μορφή φάσματος και κυματομορφής του σήματος που προέρχεται από την ταλάντωση του ταλαντωτή E από τον D, με το ratio του D στο 6.

Ας δούμε τώρα μια περίπτωση feedback FM και με ποιόν τρόπο επιδρά στον ίδιο τον ταλαντωτή, καθώς και στις παραμέτρους του ηχητικού αποτελέσματος η επανατροφοδότηση του σήματος. Θα δούμε σαν παράδειγμα μια περίπτωση απλής feedback FM, με έναν ταλαντωτή του οποίου το σήμα επανατροφοδοτείται στην είσοδό του. Δοκιμάζουμε να ανοίξουμε τον ταλαντωτή E και να τοποθετήσουμε την ένταση της ταλάντωσης στο 60, όπως στην αρχή του προηγούμενου παραδείγματος. Η διαφορά από δω και πέρα με το προηγούμενο παράδειγμα είναι πως αντί ενός δεύτερου ταλαντωτή, επιλέγουμε τον ίδιο τον E για να διαμορφώσει κατά κάποιον

τρόπο «τον εαυτό του». Στο FM8 αυτό γίνεται μέσω τετραγώνων που έχουν τοποθετηθεί πάνω από κάθε έναν από τους 6 ταλαντωτές. Χωρίς λοιπόν να χρειάζεται να ορίσουμε περιβάλλουσα και συντελεστή feedback, μπορούμε να πετύχουμε μια τροφοδότηση του σήματος πίσω στην είσοδο του ταλαντωτή με το να ορίσουμε έναν αριθμό από το 1 έως το 100 ο οποίος προσδιορίζει το συντελεστή πολλαπλασιασμού του επανατροφοδοτούμενου σήματος. Αρχικά ορίζουμε τον συντελεστή αυτό στο 50, όπως στο πρώτο παράδειγμα με τον ταλαντωτή D, προκειμένου να δούμε τη διαφορά στην ταλάντωση του E όταν η ταλάντωση προέρχεται από τον εαυτό του, με όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους όμως ίδιες. Η εικόνα 33 λοιπόν δείχνει τον ταλαντωτή E με το σήμα του να γυρνάει πίσω στην είσοδό του και το συντελεστή feedback στο 50.

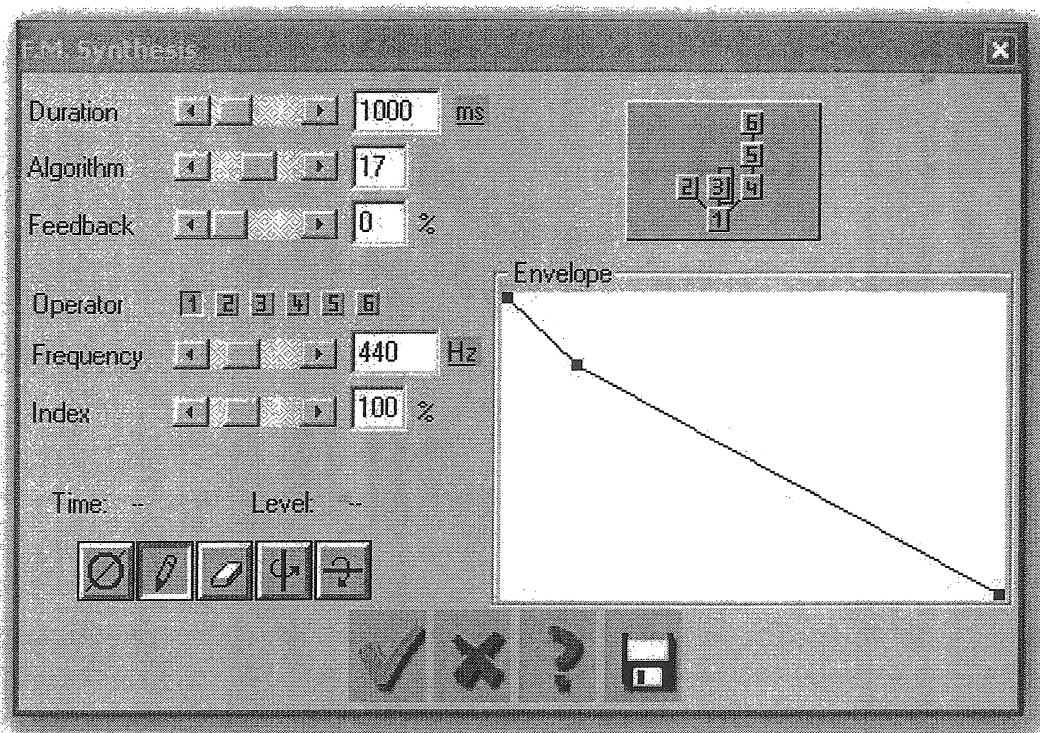


Εικόνα 33 Feedback FM με έναν ταλαντωτή.

Παρατηρούμε πολύ εύκολα πως με τα ίδια στοιχεία ταλάντωσης, όταν ο δεύτερος ταλαντωτής είναι ο ίδιος ο E, υπάρχει μεγαλύτερη και διαφορετική παραμόρφωση του αρχικού κύματος, καθώς και περισσότερους αρμονικούς σε σχέση με την εικόνα 30. Ο ήχος που παράγεται σε αυτήν την περίπτωση έχει μερικές αρκετά «πυκνές» συχνότητες, όπως φαίνεται και στο φασματογράφημα της εικόνας 33, γι' αυτό και στο αντί δίνει την αίσθηση παρουσίας «χιονιού».

4.3 Virtual Waves

Ένα άλλο πρόγραμμα, πιο γενικό από άποψη λειτουργιών, αλλά και με αρκετές δυνατότητες στην FM είναι το Virtual Waves του Nicolas Fournel. Στο πρόγραμμα αυτό θα βρει κανείς και άλλα ήδη σύνθεσης ήχου, όπως η προσθετική, καθώς και πολλούς τρόπους επεξεργασίας. Είναι ένα πολύ σχηματικό πρόγραμμα και αρκετά απλό στο χρήστη, αφού οι «μηχανές» εκτέλεσης των εργασιών τοποθετούνται πάντα σε μία επιφάνεια εργασίας, και είναι φτιαγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε οπτικά να φαίνεται στο χρήστη όσο γίνεται περισσότερο η λειτουργία τους. Στην παλέτα των γεννητριών, για την FM σύνθεση υπάρχει η μηχανή "F.M. Synthesis". Κάνοντας ένα κλικ πάνω της την διαλέγουμε, και κάνοντας άλλο ένα στην επιφάνεια εργασίας την τοποθετούμε σε αυτήν. Κάνοντας διπλό κλικ πάνω της, απεικονίζονται λεπτομερειακά οι λειτουργίες της (εικόνα 34).



Εικόνα 34 Το module “F..M. Synthesis” του Virtual Waves και οι επί μέρους παράμετροί του.

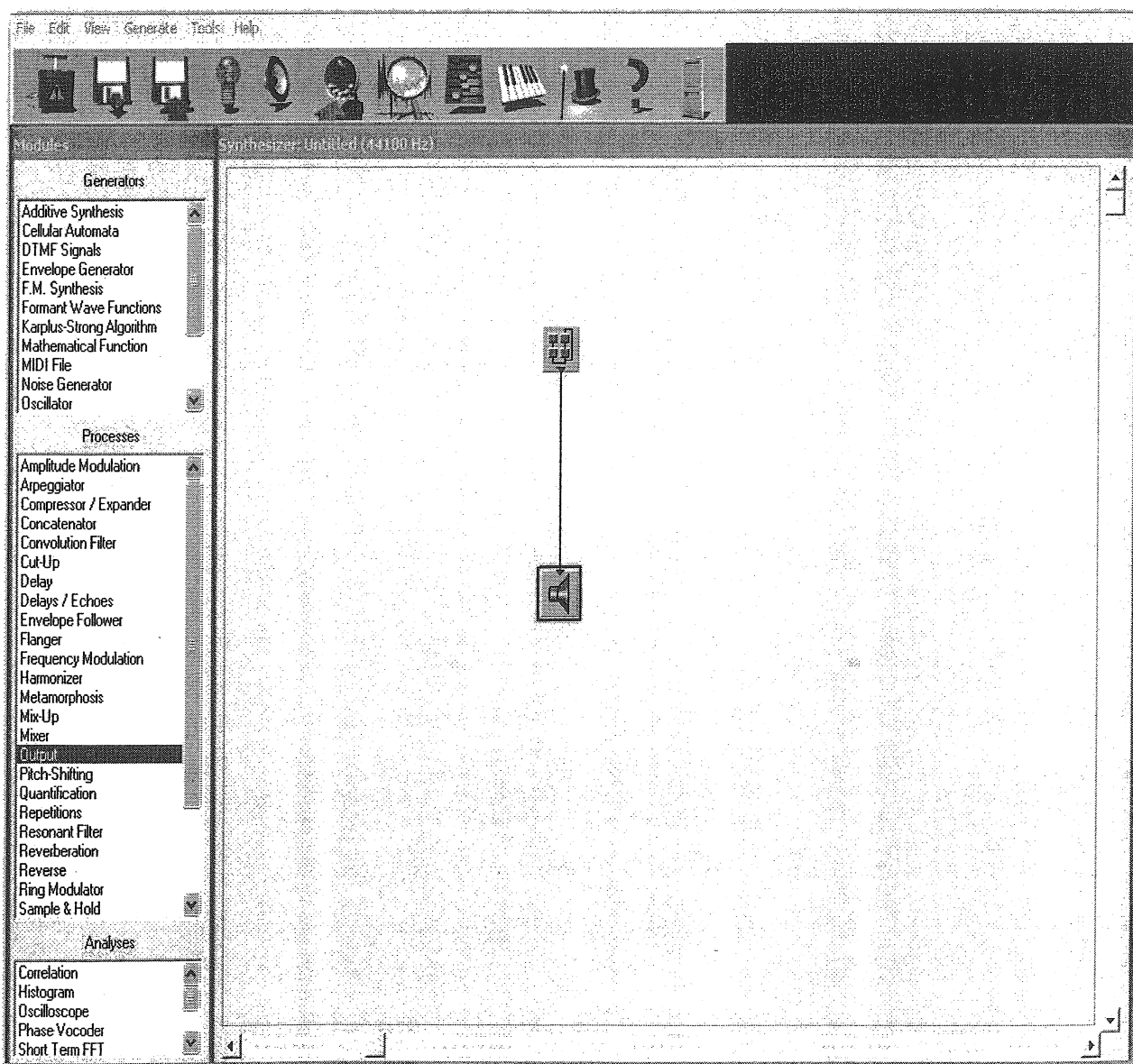
Όπως βλέπουμε στην εικόνα 34, μπορούμε για κάθε έναν από τους 6 operators⁷ που υπάρχουν να ρυθμίσουμε τη συχνότητα του ταλαντωτή, τον συντελεστή διαμόρφωσης (index), καθώς και την ένταση (πλάτος ταλάντωσης) του κάθε operator στην πορεία του χρόνου με τη βοήθεια μιας περιβάλλουσας (envelope). Ο έλεγχος του envelope για κάθε operator είναι πολύ σημαντικός, αφού έτσι μπορούμε να ρυθμίσουμε την πορεία του πλάτους (έντασης) του operator και την εξέλιξη αυτής στο χρόνο. Σε συνολικό επίπεδο τώρα, όπως βλέπουμε, μπορούμε να ρυθμίσουμε τη διάρκεια του ήχου (duration), την διάταξη των operators (algorithm) και το feedback. Το συγκεκριμένο module, κατά τους δημιουργούς του προγράμματος (πηγαίνοντας στην επιλογή Help και βρίσκοντας το module αυτό), είναι πιστή αντιγραφή του DX7 όσον αφορά τις διατάξεις των συστημάτων ταλαντωτών του (operators) και τους συνδυασμούς αυτών.

Πηγαίνοντας στην ομάδα modules “processes” (επεξεργαστές), επιλέγουμε το module “output” και το φέρνουμε στην επιφάνεια εργασίας. Μόνο με την ύπαρξη

⁷ operator = σύστημα ενός ταλαντωτή με μία περιβάλλουσα πλάτους ταλάντωσης

αυτού του module γίνεται ακουστό το αποτέλεσμα οποιασδήποτε εργασίας στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Αφού λοιπόν έχουμε κάνει τις ρυθμίσεις που επιθυμούμε στις παραπάνω παραμέτρους, συνδέουμε τα δύο modules τραβώντας μια γραμμή από το ένα στο άλλο. Πατώντας τη λάμπα στις επιλογές που υπάρχουν στο πάνω μέρος, ενεργοποιούμε το όλο σύστημα. (εικόνα 35).

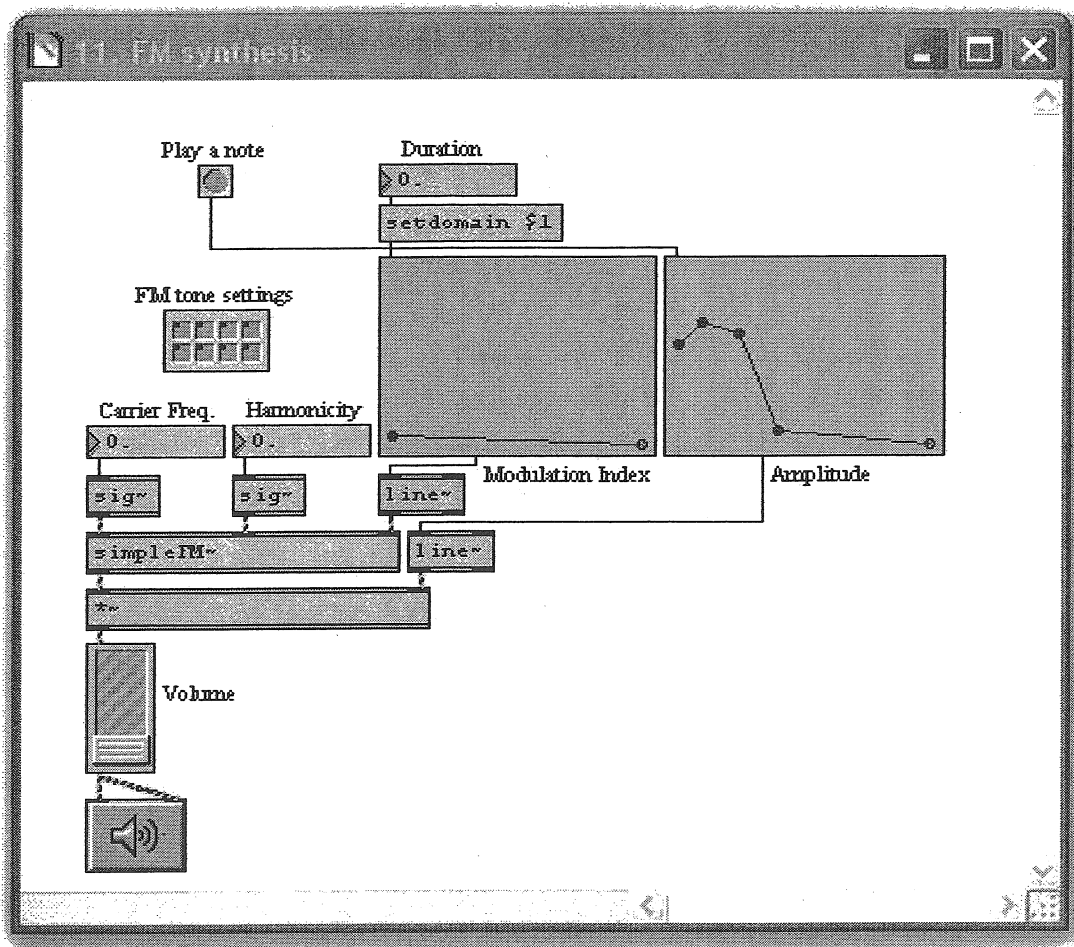
Το Virtual Waves έχει τρεις μεγάλες κατηγορίες από υπομονάδες (modules): α) Generators (παραγωγούς σήματος), β) Processes (επεξεργαστές και διαμορφωτές σήματος), και γ) Analyses (μονάδες απεικόνισης – ανάλυσης του σήματος σύμφωνα με συγκεκριμένες παραμέτρους)



Εικόνα 35 Το module “F.M. Synthesis” συνδεδεμένο με το module “output” παράγει τον ήχο που επιθυμούμε έχοντας κάνει τις ρυθμίσεις στις επιμέρους παραμέτρους του “F.M. Synthesis”.

4.4 Max MSP

Το πρόγραμμα Max MSP της εταιρίας Cycling '74 είναι στην ουσία μια γλώσσα προγραμματισμού που μπορεί να φέρει σε πέρας ένα μεγάλο πλήθος δραστηριοτήτων. Το Max MSP είναι αρκετά περίπλοκο και δύσκολο στην κατανόηση και στον προγραμματισμό του. Εδώ θα δούμε ενδεικτικά ένα παράδειγμα που υπάρχει στο tutorial του MSP για την FM και ονομάζεται “FM Synthesis”. Ανοίγοντας λοιπόν το συγκεκριμένο αρχείο, αυτό που αντικρίζουμε είναι το περιβάλλον της εικόνας 36. Η φιλοσοφία της Max MSP είναι να δημιουργεί ο προγραμματιστής μικρά σύνολα ή μηχανές λειτουργιών (patches), τα οποία στη συνέχεια απεικονίζονται μακροδομικά σαν γκριζα κουτιά, και τα οποία με τη σειρά τους λειτουργούν ως αντικείμενα στην κατασκευή άλλων patches. Έτσι δημιουργείται κατά κάποιον τρόπο ένα είδος μηχανισμού με πολλά γρανάζια, από το μικρότερο ως το μεγαλύτερο.



Εικόνα 36 Το παράδειγμα “FM Synthesis” από το tutorial του Max MSP

Όπως βλέπουμε στην εικόνα υπάρχει μία σειρά έτοιμων ρυθμίσεων (FM tone settings) στις οποίες έχουν ρυθμιστεί οι επιμέρους παράμετροι της συχνότητας φορέα (Carrier freq.), του πλάτους ταλάντωσης στο χρόνο (amplitude), του συντελεστή διαμόρφωσης επίσης στο χρόνο (modulation index), της έντασης των αρμονικών (harmonicity), καθώς και της διάρκειας του ήχου σε milliseconds. Τέλος, ρυθμίζεται η συνολική ένταση του ηχητικού αποτελέσματος (Volume). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει οποιαδήποτε από τις παραπάνω παραμέτρους σύμφωνα με το επιθυμητό αποτέλεσμα.

4.5 Επιμέρους συγκριτική αναφορά των προγραμμάτων FM8, Virtual Waves και Max MSP.

Τα τρία προγράμματα που παρουσιάστηκαν πολύ αναφορικά στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουν διαφορετική λειτουργικότητα και χρήση. Το FM8 είναι ένα πρόγραμμα αποκλειστικά φτιαγμένο για FM σύνθεση ήχου. Έχει ένα αρκετά κατανοητό και εύχρηστο για το μέσο χρήστη περιβάλλον εργασίας και όλα όσα χρειάζεται κάποιος για να κατανοήσει και να εφαρμόσει στην πράξη την έννοια της FM. Είναι ίσως το πιο κατάλληλο από τα τρία αναφερόμενα προγράμματα για την σύνθεση ενός ήχου με τη μέθοδο της FM αφού προσφέρει μεγάλη εξειδίκευση σε όλους τους τομείς της σύνθεσης. Είναι το μόνο από τα τρία που προσφέρει έλεγχο της περιβάλλουσας (envelope) για κάθε έναν από τους operators και ταυτόχρονα απεικονίζει τις περιβάλλουσες όλων των operators στον ίδιο πίνακα για μεγαλύτερο έλεγχο και ευκολία. Γενικότερα περιέχει στο ίδιο περιβάλλον αρκετά όργανα ελέγχου του ήχου, όπως μορφές κύματος, πλάτος, συχνότητα ταλάντωσης, συντελεστή διαμόρφωσης και φασματογράφημα. Όλα αυτά αρκετά προσβάσιμα και εύκολα ελεγχόμενα από έναν μέσο χρήστη.

Το Virtual Waves είναι ένα περισσότερο απλοϊκό και γενικότερης χρήσης πρόγραμμα με όχι τόσο οργανωμένες επί μέρους ρυθμίσεις, και επομένως λιγότερο εύκολο να το χειριστεί ο μέσος χρήστης προκειμένου να φτάσει στον επιθυμητό στόχο του. Παρ'όλ'αυτά περιέχει αρκετά χρήσιμα όργανα ελέγχου της FM όπως η περιβάλλουσα, τόσο για κάθε έναν operator, όσο και συνολικά, σαν ξεχωριστό module. Επίσης μπορεί κανείς να φτιάξει ένα όργανο FM συνθέτοντας ο ίδιος πολλούς ταλαντωτές που υπάρχουν στο Virtual Waves σαν ξεχωριστά modules, χωρίς όμως πολλές δυνατότητες διάταξης μεταξύ τους, λόγω του περιορισμένου αριθμού των εισόδων και εξόδων που έχει ο κάθε ταλαντωτής σαν module (oscillator). Συμπεραίνουμε επομένως πως το V. Waves είναι πρόγραμμα περισσότερο για πειραματισμό παρά για συγκεκριμένη χρήση, περιέχοντας περιορισμένες δυνατότητες και άλλων ειδών σύνθεσης, όπως προσθετικής (additive) και κυκλικής σύνθεσης (ring modulation)

Το Max MSP έχει ένα πάρα πολύ μεγάλο εύρος χρήσεων πέρα από την FM και τη γενικότερη παραγωγή και επεξεργασία ήχων και ακουστικών σημάτων, όπως μαθηματικά και προγραμματισμό και γι' αυτό είναι δύσκολο στο χειρισμό του από το

μέσο χρήστη. Με το Max MSP μπορούμε να ρυθμίσουμε όλες τις παραμέτρους που επιθυμούμε, κοστίζει όμως σε γνώσεις, αφού λίγοι γνωρίζουν σε ικανοποιητικό επίπεδο τον προγραμματισμό του. Περιοριζόμενοι στο παράδειγμα του tutorial μπορούμε να πούμε πως το συγκεκριμένο όργανο FM υπερτερεί έναντι και των δύο προηγούμενων προγραμμάτων όσον αφορά τον έλεγχο του συντελεστή διαμόρφωσης στη διάρκεια του χρόνου. Κανένα από τα προηγούμενα προγράμματα δεν προσφέρει όργανο ελέγχου του συντελεστή διαμόρφωσης, την ώρα που το Max MSP το προσφέρει και μάλιστα με τη μορφή τροποποιήσιμου, ενεργού γραφήματος.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η FM σύνθεση, με την άνθηση, τη γρήγορη εκμετάλλευση και ανάπτυξή της, καθώς και με την εξάπλωση της στο κοινό μέσω της ενσωμάτωσής της σε αναλογικές συσκευές δημιουργίας και επεξεργασίας μουσικής, έμεινε στην ιστορία ως το πιο διαδεδομένο, εύχρηστο και εμπορικό είδος σύνθεσης ολόκληρου σχεδόν του 20^{ου} αιώνα. Προσιτή στον οποιονδήποτε με τη διάθεση μικρού χρηματικού ποσού, του έδινε τη δυνατότητα να πειραματιστεί με τη σύνθεση ήχων, μεταβάλλοντας παραμέτρους της, χωρίς απαραίτητα να καταλαβαίνει ο χρήστης τεκμηριωμένα τις ενέργειές του, δίνοντάς του παρ' όλ' αυτά τη δυνατότητα απεριόριστων πειραματισμών με μεγάλες δυνατότητες, πράγμα που θα μπορούσε να τον οδηγήσει στο στόχο του. Η FM σύνθεση αντικαταστάθηκε πλέον στη δημοτικότητά της από άλλα, πιο σύγχρονα είδη και μεθόδους ηλεκτρονικής σύνθεσης ήχου, πάντα όμως θα αποτελεί ένα τεράστιο κομμάτι στην ιστορία της δημιουργίας ήχων από τον άνθρωπο, κομμάτι που θα θυμούνται οι παλαιότεροι και που θα μαθαίνουν σε ακαδημαϊκό και πειραματικό επίπεδο οι νεότεροι.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Beauchamp, J., 1996, *Music 4C Introduction*, School of music, University of Illinois at Urbana-Champaign. Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 4 Μαρτίου 2007
http://ems.music.uiuc.edu/beaucham/software/m4c/m4c_intro_html/M4C_intro.html
- Chowning, J., 1973, The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation. *Journal of the Audio Engineering Society* 21(7): 526-534.
- Chowning, J., 1989, Frequency modulation synthesis of the singing voice. Στο βιβλίο του Matthews and Pierce (eds) *Current Directions in computer Music Research*. Cambridge, Massachusetts. The MIT Press
- Chowning, J., 2000, *Sound Synthesis, Acoustics, and Perception: a rich intersection*, The Center for Computer Research in Music and Acoustics Stanford University. Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 1 Μαρτίου 2007
<http://profs.sci.univr.it/~dafx/Final-Papers/pdf/Chowning.pdf>
- De Poli, G. 1983, A tutorial on Digital sound synthesis techniques. *Computer Music Journal* 7(4): 8-26.
- Dodge, C., Jerse, T., 1985, *Computer Music Synthesis, Composition and Performance*, New York, NY: Schirmer Books.
- Hass, J., 1995, *Principles of Audio-Rate Frequency Modulation*, Center for Electronic and Computer Music, Indiana University School of Music. Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 5 Μαρτίου 2007 <http://www.indiana.edu/~emusic/fm/fm.htm>
- Holmes, T., 2002, *Electronic and Experimental Music*, New York: Routledge
- Kuehnl, E., *A brief history of computer music*. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο στις 20 Ιανουαρίου 2007 <http://music.calarts.edu/~eric/cm.html>
- Miranda, Eduardo Reck, 2002, *Computer Sound Design: Synthesis Techniques And Programming* [2^η έκδοση] Oxford UK: Focal Press
- Reid, G., 2001, *Yamaha GS1 & DX1*, Sound on Sound, Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 6 Απριλίου 2007.
<http://www.soundonsound.com/sos/aug01/articles/retrofmpt1.asp>
- Roads, Curtis, 1996, *The Computer Music Tutorial*, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press
- Smith, J., *Spectral audio signal processing*. CCRMA, Stanford University. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο στις 7 Ιανουαρίου 2007
http://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/Additive_Synthesis_Computer_Music.html

Tomisawa, N., 1981 "Tone production method for an electronic music instrument." U.S. Patent 4.249.447 στον Roads, Curtis, 1996, *The Computer Music Tutorial*, Massachusetts Institute of technology, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press

Truax, B., 1977, The POD System of interactive composition programs. *Computer Music Journal*, 1(3): 30-39

Διαμαντόπουλος Τ., 2004, *Προγραμματισμός & σύνθεση ήχου*, Αθήνα, Εκδόσεις ΕΛΛΗΝ

ΔΙΑΔΥΚΤΙΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

2007, *Vintage Synth Explorer* Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 14 Φεβρουαρίου 2007 <http://www.vintagesynth.com/index2.html>

Darter, T., *John Chowning Exclusive Interview With The Father Of Digital FM Synthesis*. Ανακτήθηκε από το διαδίκτυο στις 02 Απριλίου 2007 <http://www.maths.abdn.ac.uk/~bensondj/html/Chowning.html>

FM Tone Generation, Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 2 Φεβρουαρίου 2007 <http://www.chipple.net/dx7/english/fm.tone.generation.html>
http://www.tweakheadz.com/review_of_the_fm7_softsynth.htm

Phase Modulation, Wikipedia. Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 2 Απριλίου 2007 http://en.wikipedia.org/wiki/Phase_Modulation

Review of Native Instruments FM7 and FM8 Software Synths, TweakHeadz Lab. Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 7 Μαρτίου 2007

Yamaha DX7, Wikipedia. Ανακτήθηκε από το Διαδίκτυο στις 3 Μαρτίου 2007 <http://en.wikipedia.org/wiki/DX7>